MINISTERUL EDUCAȚIEI
AL REPUBLICII MOLDOVA

Mihai **MARINCIUC** | Ion **NACU**
Spiridon **RUSU** | Ștefan **TIRON**

# Fizică
# Astronomie

**Manual pentru clasa a XII-a**

Știința, 2017

CZU 53+52 (075.3)
F 62

Manualul este elaborat conform Curriculumului disciplinar în vigoare, aprobat prin Ordinul ministrului educației (nr. 510 din 13 iunie 2011) și finanțat din *Fondul special pentru manuale*.

**Contribuția autorilor:**
*Mihai Marinciuc* – cap. 1 (temele 1.1–1.5), cap. 4–6, 7 (temele 7.1–7.6), cap. 9 (tema 9.1);
*Spiridon Rusu* – cap. 1 (temele 1.6–1.8), cap. 2, 3, 7 (temele 7.7, 7.8);
*Ion Nacu* – cap. 8 (temele 8.1–8.3 (a, b, c), 8.4);
*Ștefan Tiron* – cap. 8 (temele 8.3 (d), 8.5–8.7), cap. 9 (tema 9.2)

**Comisia de evaluare:** *Viorel Dușciac*, doctor conferențiar, USM; *Tatiana Comerzan*, șefa Centrului metodic DGÎTS Cimișlia, prof. școlar (gr. did. superior); *Ion Albu,* prof. școlar (gr. did. superior), Liceul Teoretic „Mihai Eminescu", Drochia; *Efim Lungu*, prof. școlar (gr. did. superior), Liceul Teoretic „Mihai Corlăteanu", Glinjeni, Fălești; *Pavel Stratan*, prof. școlar (gr. did. I), Liceul Teoretic „Onisifor Ghibu", Orhei

**Acest manual este proprietatea Ministerului Educației al Republicii Moldova.**

Liceul _____

Manualul nr. _____

| Anul de folosire | Numele de familie și prenumele elevului | Anul școlar | Aspectul manualului | |
|---|---|---|---|---|
| | | | la primire | la restituire |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

Dirigintele controlează dacă numele elevului este scris corect.
Elevul nu trebuie să facă niciun fel de însemnări în manual.
Aspectul manualului (la primire și restituire) se va aprecia cu calificativele: *nou, bun, satisfăcător, nesatisfăcător.*

---

**Responsabil de ediție:** *Larisa Dohotaru*
**Redactor:** *Mariana Belenciuc*
**Corectori:** *Maria Cornesco, Tatiana Darii*
**Redactor tehnic:** *Nina Duduciuc*
**Machetare computerizată:** *Olga Ciuntu, Valentin Vârtosu jr.*
**Copertă:** *Romeo Șveț*

**Întreprinderea Editorial-Poligrafică *Știința*,**
str. Academiei, nr. 3; MD-2028, Chișinău, Republica Moldova;
tel.: (+373 22) 73-96-16; fax: (+373 22) 73-96-27;
e-mail: prini_stiinta@yahoo.com; prini@stiinta.asm.md;
www.editurastiinta.md

**DIFUZARE:**
**ÎM Societatea de Distribuție a Cărții *PRO-NOI*,**
str. Alba-Iulia, nr. 75; MD-2051, Chișinău, Republica Moldova;
tel.: (+373 22) 51-68-17, 71-96-74; fax: (+373 22) 58-02-68;
e-mail: info@pronoi.md; www.pronoi.md

Toate drepturile asupra acestei ediții aparțin Întreprinderii Editorial-Poligrafice *Știința*.

**Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții**

**Fizică. Astronomie:** Manual pentru clasa a 12-a / Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu, Ion Nacu [et al.]; Min. Educației al Rep. Moldova. – Ch.: Î.E.P. *Știința*, 2017 (Tipogr. „BALACRON" SRL). – 168 p.

ISBN 978-9975-85-074-2

53+52 (075.3)

ISBN 978-9975-85-074-2

© *Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu, Ion Nacu, Ștefan Tiron*. 2011, 2017
© Î.E.P. *Știința*. 2011, 2017

# CUPRINS[1]


**Capitolul 1. ELECTROMAGNETISMUL**

**1.1.** Câmpul magnetic. Liniile câmpului magnetic ... 5
**1.2.** Inducţia magnetică. Forţa electromagnetică ... 7
**1.3.** Acţiunea câmpului magnetic asupra sarcinilor electrice în mişcare. Forţa Lorentz ..... 9
**1.4.** Mişcarea particulelor încărcate în câmp magnetic ..... 11
**1.5.*** Proprietăţile magnetice ale substanţei. Permeabilitatea relativă ..... 13
**1.6.** Inducţia electromagnetică ..... 15
**a.** Fenomenul inducţiei electromagnetice. Aplicaţii practice ..... 15
**b.** Fluxul câmpului magnetic. Regula lui Lenz ... 17
**c.** Legea inducţiei electromagnetice. Tensiunea electromotoare de inducţie ..... 19
**1.7.** Autoinducţia. Inductanţa circuitului ..... 21
**a.** Fenomenul de autoinducţie ..... 21
**b.** Inductanţa. *T.e.m.* de autoinducţie ..... 22
**1.8.** Energia câmpului magnetic ..... 23

**Capitolul 2. CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV**

**2.1.** Generarea tensiunii electromotoare alternative .. 24
**2.2.** Valorile efective ale intensităţii şi tensiunii alternative ..... 26
**2.3.*** Circuite în curent alternativ ..... 27
**a.** Particularităţile circuitelor în curent alternativ ..... 27
**b.** Rezistor ideal în curent alternativ ..... 28
**c.** Bobină ideală în curent alternativ ..... 28
**d.** Condensator ideal în curent alternativ ..... 30
**e.** Circuite *RLC* serie în curent alternativ. Legea lui Ohm ..... 31
**f.** Rezonanţa tensiunilor. Factorul de calitate .... 33
**2.4.*** Puterea în circuit de curent alternativ ..... 35
**2.5.** Transportul energiei electrice la distanţe mari ... 38
**a.** Generatorul de curent alternativ ..... 38
**b.** Randamentul liniei de transport. Impactul asupra organismelor vii ..... 39
**c.** Transformatorul ..... 40

**Capitolul 3. OSCILAŢII ŞI UNDE ELECTROMAGNETICE**

**3.1.** Oscilaţii electromagnetice ..... 42
**a.** Circuitul oscilant ideal ..... 42
**b.*** Analogia dintre oscilaţiile mecanice şi electromagnetice. Perioada şi frecvenţa oscilaţiilor electromagnetice ..... 43
**c.*** Oscilaţii electromagnetice amortizate şi forţate ..... 44
**3.2.*** Câmpul electromagnetic ..... 45
**3.3.** Undele electromagnetice ..... 47
**a.*** Existenţa undelor electromagnetice ..... 47
**b.** Propagarea undelor electromagnetice ..... 47
**3.4.** Clasificarea undelor electromagnetice ..... 49
**3.5.** Comunicaţii prin unde electromagnetice ..... 50
**a.** Principiile radiocomunicaţiei ..... 50
**b.** Radiolocaţia ..... 51
**3.6.** Evoluţia concepţiilor despre natura luminii ..... 52
**3.7.** Interferenţa luminii ..... 53
**a.** Coerenţa undelor luminoase. Condiţiile de observare a interferenţei luminii ..... 54
**b.*** Dispozitivul lui Young ..... 55
**c.*** Lama cu feţe plan-paralele ..... 56
**d.*** Inelele lui Newton ..... 57
**e.** Aplicaţii ale interferenţei luminii ..... 58
**3.8.** Difracţia luminii ..... 60
**a.** Studiul calitativ al difracţiei luminii ..... 60
**b.** Difracţia luminii de la o fantă. Reţeaua de difracţie ..... 61
**3.9.*** Polarizarea luminii ..... 65
**a.** Modelul mecanic al stării de polarizare. Planul de polarizare ..... 65
**b.** Starea de polarizare a luminii. Transversalitatea undelor de lumină ..... 65
**c.** Polarizarea luminii prin reflexie ..... 67
**3.10.*** Împrăştierea luminii ..... 68

**Capitolul 4. ELEMENTE DE TEORIE A RELATIVITĂŢII RESTRÂNSE**

**4.1.*** Principiul relativităţii în fizică. Postulatele lui Einstein ..... 69


[1] Temele, exerciţiile, problemele marcate convenţional cu * sunt destinate doar elevilor de la profilul real.

**4.2.*** Spaţiul şi timpul în teoria relativităţii restrânse ... 71
**a.** Relativitatea simultaneităţii ... 71
**b.** Relativitatea intervalelor de timp ... 72
**c.** Relativitatea dimensiunilor longitudinale ... 73
**4.3.*** Transformările lui Lorentz şi consecinţele acestora ... 75
**a.** Transformările lui Lorentz ... 75
**b.** Compunerea relativistă a vitezelor ... 76
**4.4.*** Noţiune de dinamică relativistă ... 77

**Capitolul 5. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ**
**5.1.** Radiaţia termică. Ipoteza cuantelor ... 79
**5.2.** Efectul fotoelectric extern ... 81
**a.** Efectul fotoelectric. Legi experimentale ... 81
**b.** Fotonii. Teoria cuantică a efectului fotoelectric extern ... 83
**c.** Celule fotoelectrice ... 85
**5.3.*** Presiunea luminii ... 86
**5.4.*** Proprietăţile ondulatorii ale microparticulelor. Dualismul undă–corpuscul ... 88
**a.** Undele de Broglie. Difracţia electronilor ... 88
**b.** Microscopul electronic ... 89

**Capitolul 6. ELEMENTE DE FIZICĂ A ATOMULUI**
**6.1.** Fenomene în care se manifestă structura compusă a atomului ... 91
**6.2.** Experimentul lui Rutherford. Modelul planetar al atomului ... 93
**6.3.** Modelul atomului după Bohr ... 95
**a.** Postulatele lui Bohr ... 95
**b.*** Atomul de hidrogen în cadrul teoriei lui Bohr ... 95
**6.4.*** Emisia stimulată a radiaţiei. Laserul ... 99

**Capitolul 7. ELEMENTE DE FIZICĂ A NUCLEULUI ATOMIC. PARTICULE ELEMENTARE**
**7.1.** Nucleul atomic: caracteristicile fizice şi structura ... 102
**7.2.*** Forţele nucleare. Energia de legătură a nucleului ... 105
**7.3.** Radioactivitatea ... 107
**a.** Descoperirea radioactivităţii. Transformări radioactive ... 107
**b.*** Legea dezintegrării radioactive ... 108
**7.4.*** Reacţiile nucleare ... 111
**a.** Reacţiile nucleare. Caracteristici generale ... 111
**b.** Fisiunea nucleelor de uraniu ... 111
**c.** Reacţia în lanţ. Reactorul nuclear ... 112
**d.** Fuziunea termonucleară ... 113
**7.5.*** Detectoare de radiaţii ionizante ... 115
**7.6.*** Efectul biologic al radiaţiilor nucleare ... 118
**7.7.*** Particule elementare ... 119
**a.** Descoperirea particulelor elementare ... 119
**b.** Particule şi antiparticule ... 120
**7.8.*** Interacţiuni fundamentale. Clasificarea particulelor elementare ... 121

**Capitolul 8. ELEMENTE DE ASTRONOMIE**
**8.1.** Astronomia în cadrul ştiinţelor fizice ... 123
**a.** Obiectul şi problemele fundamentale ale astronomiei ... 123
**b.** Metodele de cercetare astrofizică ... 124
**8.2.** Elemente de astronomie practică ... 125
**a.** Mişcarea aparentă a stelelor. Constelaţiile ... 125
**b.** Sfera cerească şi elementele ei ... 127
**c.** Mişcarea anuală aparentă a Soarelui. Ecliptica ... 127
**d.** Sistemele de coordonate cereşti. Culminaţia aştrilor. Echinocţiile şi solstiţiile ... 128
**e.** Mişcarea periodică a Pământului şi a Lunii. Fazele Lunii. Eclipsele de Soare şi de Lună ... 130
**f.** Timpul şi măsurarea lui. Calendarul ... 133
**8.3.** Sistemul Solar ... 135
**a.** Planetele de tip terestru şi planetele gigante. Sateliţii planetelor. Planetele pitice ... 135
**b.** Corpurile mici ale Sistemului Solar ... 139
**c.** Pământul. Structura internă, hidrosfera, atmosfera şi magnetosfera Pământului. Luna. Mareele ... 142
**d.** Noţiuni de cosmogonie. Originea şi evoluţia Sistemului Solar ... 145
**8.4.** Elemente de mecanică cerească ... 146
**a.** Mişcarea aparentă a planetelor. Concepţia heliocentrică a Universului ... 146
**b.** Perioada siderală şi perioada sinodică de revoluţie a planetelor. Legile lui Kepler ... 148
**8.5.** Soarele ... 149
**a.** Structura internă şi atmosfera Soarelui ... 149
**b.** Activitatea solară şi relaţiile Soare–Pământ ... 150
**8.6.** Stelele ... 151
**a.** Clasificarea stelelor ... 151
**b.** Diagrama „spectru–luminozitate". Evoluţia stelelor. Stelele variabile şi nestaţionare ... 152
**8.7.** Noţiuni de cosmologie ... 154
**a.** Galaxia noastră. Roiuri stelare. Mişcarea proprie a stelelor şi a Sistemului Solar. Mişcarea de rotaţie a Galaxiei ... 154
**b.** Clasificarea galaxiilor. Galaxii cu nuclee active. Quasarii. Expansiunea Universului. Marea Explozie ... 155

**Capitolul 9. TABLOUL ŞTIINŢIFIC AL LUMII**
**9.1.** Etapele de dezvoltare a tabloului fizic al lumii ... 158
**9.2.** Astronomia şi concepţia ştiinţifică despre lume ... 161

**Planşă color** ... 162

**Teste de evaluare sumativă** ... 164

**Răspunsuri la probleme** ... 168

Capitolul 1

# ELECTROMAGNETISMUL

## 1.1. CÂMPUL MAGNETIC. LINIILE CÂMPULUI MAGNETIC

**Să ne amintim**

Corpurile care au proprietatea de a atrage fierul sunt numite **magneţi**. Aceştia pot fi **naturali** şi **artificiali**.

Regiunile magnetului în care atracţia obiectelor din fier este maximă sunt numite **poli magnetici**.

**Polii magnetici nu pot fi separaţi unul de altul.**

Magnetul mic care se poate roti liber în jurul axei verticale, perpendiculare pe direcţia ce trece prin polii săi – numit **ac magnetic** – ocupă în spaţiu o poziţie anumită: acesta indică aproximativ direcţia terestră sud-nord. Polul magnetului orientat spre polul terestru nord este numit pol magnetic **nord** (cu simbolul N), celălalt pol al magnetului fiind numit **sud** (cu simbolul S).

**Polii magneţilor de acelaşi nume se resping, iar polii de nume diferite se atrag.**

Ţinând seama de orientarea acului magnetic, precum şi de caracterul interacţiunii polilor magnetici, conchidem că *în regiunea polului geografic terestru* ***Nord*** *se află polul geomagnetic* ***sud****, iar în regiunea polului geografic* ***Sud*** *se află polul geomagnetic* ***nord***.

Interacţiunea magnetică se realizează prin intermediul **câmpului magnetic** existent în jurul magneţilor.

Câmpurile magnetice se cercetează cu ajutorul ácelor magnetice. Pentru a obţine o anumită imagine a câmpului, se trasează **liniile magnetice**.

***Liniile câmpului magnetic*** **sunt liniile trasate astfel încât tangentele duse în orice punct al lor coincid cu direcţia acului magnetic în locul respectiv.**

În *figura 1.1* sunt reprezentate liniile magnetice – ***spectrul câmpului magnetic*** – ale unei bare magnetice rectilinii. Ele ies din polul magnetic nord şi intră în polul magnetic sud. Observăm că în vecinătatea polilor magnetici, în regiunile în care acţiunea magnetică este mai puternică, densitatea liniilor magnetice este mai mare. Şi invers, în regiunile în care acţiunea magnetică este mai slabă, densitatea liniilor magnetice este mai mică. Situaţia dată este similară celei din cazul câmpului electrostatic.

Spectrul câmpului magnetic poate fi vizualizat folosind pilitură de fier, în locul ácelor magnetice.

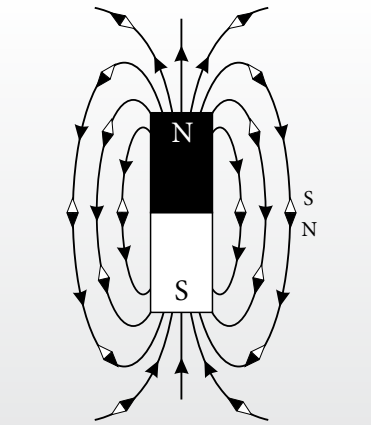



*Fig. 1.1*

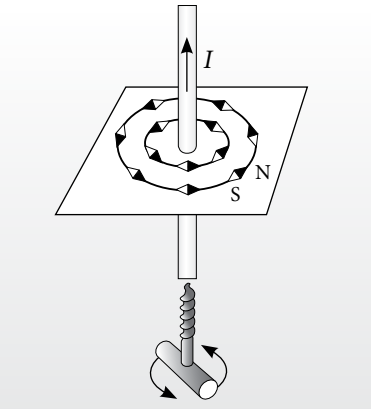



*Fig. 1.2*

În anul 1820, fizicianul danez Hans Cristian Oersted (1777–1851) a observat acţiunea curentului electric asupra acului magnetic. Astfel, s-a stabilit că **în jurul conductorului prin care circulă curent electric există câmp magnetic.**

Curentul electric prezintă mişcarea ordonată a purtătorilor de sarcină electrică, prin urmare **surse ale câmpului magnetic sunt particulele, încărcate cu sarcină electrică, în mişcare**. Dacă particulele încărcate sunt în repaus, ele generează numai câmp electric. Pe când aflându-se în mişcare ele generează nu numai câmp electric, ci şi câmp magnetic.

Pentru a stabili forma liniilor magnetice ale câmpului creat de un conductor parcurs de curent electric – spectrul câmpului magnetic –, trecem conductorul prin orificiul unei bucăţi de carton. Plasăm conductorul vertical, iar cartonul orizontal şi aşezăm pe el mai multe ace magnetice mici, care se pot roti în jurul axelor verticale. În lipsa curentului, ácele sunt paralele între ele şi indică cu capătul nord spre polul geomagnetic sud. Dacă însă prin conductor circulă curent electric, ácele îşi schimbă direcţiile formând cercuri (*fig. 1.2*). Conchidem că **liniile magnetice ale câmpului creat de un conductor rectiliniu parcurs de curent au forma unor cercuri situate în plane perpendiculare pe conductor, având ca centre punctele de intersecţie ale planelor cu acesta**.

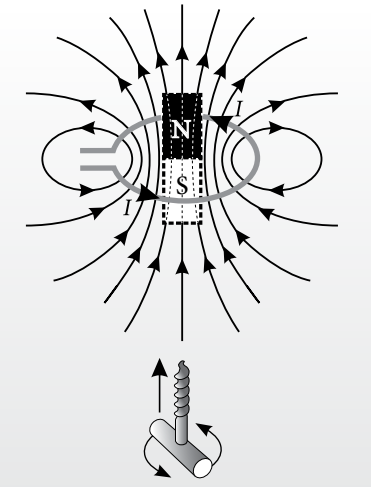



*Fig. 1.3*

Sensul liniilor magnetice este indicat de polul nord al ácelor magnetice. Între sensul liniilor magnetice şi sensul curentului electric există o anumită legătură care poate fi exprimată sub formă de mai multe reguli. Cea mai frecvent folosită este **regula burghiului cu filet de dreapta**:

> La rotirea **burghiului cu filet de dreapta**, astfel încât acesta să se deplaseze în sensul curentului electric, sensul rotaţiei mânerului său indică sensul liniilor magnetice.

În *figura 1.2* se observă o proprietate importantă: **liniile magnetice sunt linii închise**. În cazul barei magnetice, liniile reprezentate în *figura 1.1* din exteriorul ei sunt închise în interiorul barei. Astfel, liniile magnetice se deosebesc esenţial de liniile intensităţii câmpului electrostatic, care sunt linii deschise, având capetele lor la sarcinile electrice sau la infinit. Compararea caracterului liniilor magnetice cu al celor electrice denotă lipsa în natură a unor sarcini magnetice care ar avea un rol similar celui al sarcinilor electrice în cazul interacţiunii electrostatice.

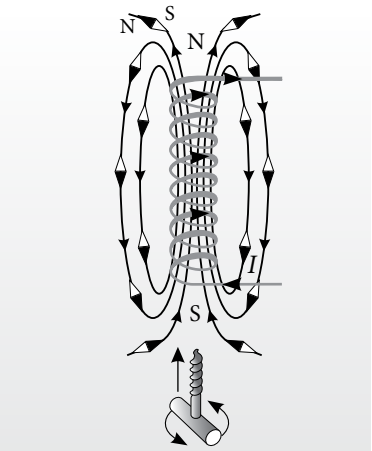



*Fig. 1.4*

Cu ajutorul ácelor magnetice mici poate fi stabilit caracterul liniilor câmpului pentru curentul circular, cum este numit inelul conductor parcurs de curent electric (*fig. 1.3*). Comparând *figurile 1.3* şi *1.1,* constatăm că liniile câmpului magnetic al curentului circular sunt similare celor ale unei bare magnetice scurte (în *figura 1.3* bara este reprezentată prin linii întrerupte). Pentru a determina sensul liniilor magnetice ale curentului circular, poate fi folosită o altă variantă a **regulii burghiului**:

> Sensul liniilor magnetice coincide cu sensul deplasării burghiului la rotirea mânerului său în sensul curentului electric din inel.

Această regulă se aplică şi la determinarea sensului liniilor magnetice în interiorul unei bobine lungi parcurse de curent electric, denumită, de obicei, **solenoid** (*fig. 1.4*). Câmpul magnetic al solenoidului este similar câmpului barei magnetice (*fig. 1.1*). În interiorul solenoidului liniile câm-

pului sunt paralele și au densitate constantă. Acest câmp este **omogen**.

Asemănarea dintre câmpurile magnetice ale curentului circular și barei magnetice a fost stabilită în anul 1820 de către André-Marie Ampère (1775–1836), înainte de introducerea noțiunii de câmp și de linii ale acestuia. Ea a fost folosită pentru explicarea proprietăților magnetice ale substanței.

Pentru a explica magnetismul terestru, Ampère a presupus existența în interiorul Pământului a unor curenți circulari. În prezent se consideră că acești curenți există în nucleul metalic al Pământului.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Ce prezintă polii unui magnet? Cum interacționează polii magnetici de același nume? Dar de nume diferite?
2. Ce proprietate a acului magnetic permite folosirea lui în busolă?
3. Ce reprezintă liniile magnetice? Cum se determină sensul lor?
4. Care este caracterul acțiunii magnetice în funcție de densitatea liniilor magnetice?
5. În ce constă concluzia principală dedusă în baza experienței lui Oersted?
6. Care sunt sursele câmpului magnetic?
7. Care este deosebirea principială dintre caracterul liniilor magnetice și cel al liniilor de intensitate a câmpului electrostatic?

## 1.2. INDUCȚIA MAGNETICĂ. FORȚA ELECTROMAGNETICĂ

### Să ne amintim

Pentru a defini mărimea fizică ce caracterizează câmpul magnetic, vom trece în revistă mărimile respective introduse pentru câmpul gravitațional și cel electrostatic. În ambele cazuri se cercetează acțiunea câmpului asupra unui **corp de probă**, introdus în fiecare dintre ele.

În cazul câmpului gravitațional, corpul de probă este un corp punctiform de masă $m$. La introducerea în unul și același punct al câmpului a corpurilor de probă de mase $m$ diferite, asupra lor acționează forțe $\vec{F}$ diferite. Experimentele arată însă că raportul $\frac{\vec{F}}{m}$ rămâne constant. Anume această mărime $\vec{I}=\frac{\vec{F}}{m}$, denumită **intensitate a câmpului gravitațional**, este considerată caracteristica de forță a acestuia.

Corpul de probă în cazul câmpului electrostatic reprezintă un corp punctiform electrizat cu sarcina $q$. La introducerea corpurilor de probă cu sarcini diferite $q$ în unul și același punct al câmpului, asupra acestora acționează forțe $\vec{F}$ diferite, raportul $\frac{\vec{F}}{q}$ fiind același. Raportul $\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}$ este caracteristica de forță, denumită **intensitate a câmpului electric**.

Pentru a cerceta câmpul magnetic, efectuăm experimentul următor. De un dinamometru sensibil suspendăm un cadru de forma unui triunghi isoscel format din mai multe spire conductoare, izolate între ele. Latura inferioară a cadrului se află între polii unor magneți permanenți în formă de potcoavă (*fig. 1.5*). Dinamometrul indică forța de greutate a cadrului. Montăm circuitul format din cadru, sursă de curent, ampermetru și reostat (în figură nu sunt indicate). Dacă intensitatea curentului printr-o spiră este egală cu $I$, intensitatea lui prin latura cadrului este egală cu $NI$, unde $N$ este numărul de spire.

În prezența curentului electric, asupra porțiunii de cadru aflată între polii magnetici acționează o forță, iar indicația dinamometrului se mărește sau se micșorează în funcție de sensul curentului în cadru. Prin urmare, câmpul magnetic acționează asupra conductorului parcurs de curent electric cu o forță denumită **forță electromagnetică** $F_m$. Calculând diferența indicațiilor dinamometrului, se determină valoarea forței electromagnetice.

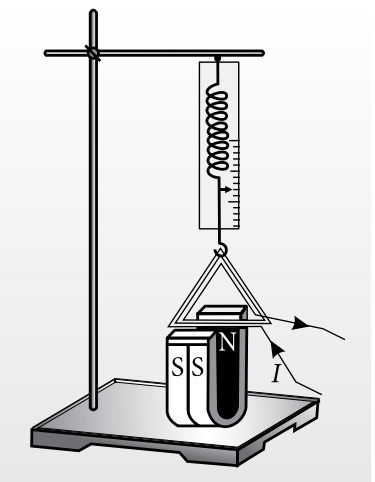


*Fig. 1.5*

Variind intensitatea curentului $I$ cu ajutorul reostatului, stabilim că $F_m \sim I$. Pentru a modifica lungimea $l$ a porțiunii de conductor, aflată în câmp magnetic, se folosesc mai mulți magneți de același fel. Se constată că în cazul a doi magneți forța electromagnetică este de două ori mai mare decât în cazul numai a unuia din ei, stabilindu-se astfel că $F_m \sim l$. Rotind magneții în jurul axei verticale, modificăm unghiul α dintre conductorul parcurs de curent și linia magnetică. Se observă că micșorarea acestui unghi este însoțită de micșorarea forței electromagnetice.

Să introducem caracteristica de forță a câmpului magnetic. Vom admite, pentru simplitate, că acesta este omogen. Câmpul magnetic acționează asupra conductorului parcurs de curent. De aceea în calitate de corp de probă se ia o porțiune rectilinie a conductorului, denumită **element de curent**. El este caracterizat atât de intensitatea curentului $I$ în el, cât și de lungimea $l$ a porțiunii, adică de produsul $Il$. După cum s-a menționat, forța electromagnetică ce acționează asupra elementului de curent depinde nu numai de produsul $Il$, ci și de orientarea elementului de curent față de câmpul magnetic. Forța este maximă ($F = F_{max}$), dacă conductorul este perpendicular pe liniile magnetice și este nulă ($F = 0$), dacă conductorul este orientat de-a lungul acestor linii.

S-a stabilit că pentru locul dat al câmpului magnetic forța $F_{max}$ ia valori diferite pentru valori diferite ale produsului $Il$, dar mărimea $\frac{F_{max}}{Il}$ rămâne constantă. Această mărime este considerată caracteristica de forță a câmpului magnetic cu denumirea de **inducție a câmpului magnetic** sau, simplu, **inducție magnetică**, cu simbolul $\vec{B}$.

Astfel, conform definiției, valoarea inducției magnetice

$$B = \frac{F_{max}}{Il}. \qquad (1.1)$$

***Inducția magnetică* este o mărime vectorială al cărei modul este egal cu raportul dintre valoarea forței maxime, care acționează din partea câmpului magnetic omogen asupra unei porțiuni rectilinii de conductor, și produsul intensității curentului în conductor la lungimea acestei porțiuni.**

Unitatea de inducție magnetică este numită **tesla** (**T**), în memoria savantului croat Nicola Tesla (1856–1943), considerat fondator al industriei electrotehnice moderne. Conform formulei (1.1), avem:

$$[B] = \frac{[F_{max}]}{[I][l]} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \text{T},$$

adică 1 T = 1 N/(A·m).

***Un tesla* (T) este inducția câmpului magnetic omogen, care acționează cu o forță maximă de 1 N asupra porțiunii cu lungimea de 1 m a unui conductor rectiliniu destul de lung, parcurs de un curent electric de intensitate 1 A.**

Direcția și sensul vectorului inducției magnetice $\vec{B}$ sunt indicate de direcția sud-nord (S–N) a acului magnetic situat în locul respectiv al câmpului.

Introducerea vectorului inducției $\vec{B}$ necesită precizarea unor noțiuni menționate mai sus. **Linie magnetică** a fost definită linia în fiecare punct al căreia direcția tangentei coincide cu cea a acului magnetic (tema 1.1). Prin urmare, în fiecare punct al acestei linii vectorul $\vec{B}$ are direcția tangentei ei. Acest lucru justifică precizarea denumirii complete a liniei magnetice – **linie de inducție magnetică**. În corespundere cu cele menționate în tema 1.1, liniile de inducție sunt linii închise. Câmpul ale cărui linii sunt închise este numit **câmp turbionar**. Prin urmare, **câmpul magnetic este turbionar**. Încă o precizare: **câmp omogen este câmpul în toate punctele căruia inducția magnetică $\vec{B}$ este aceeași**.

Pornind de la formula (1.1), exprimăm forța electromagnetică maximă

$$F_{max} = IlB. \qquad (1.2)$$

După cum s-a menționat, forța electromagnetică este maximă, dacă conductorul rectiliniu este perpendicular pe vectorul inducției magnetice $\vec{B}$. S-a stabilit că, la rândul său, forța electromagnetică $\vec{F}_{max}$ este perpendiculară atât pe conductor, cât și pe vectorul $\vec{B}$. Sensul acestei forțe se determină, cel mai frecvent, folosind **regula mâinii stângi**:

> Dacă așezăm mâna stângă astfel încât liniile de inducție magnetică să intre perpendicular în palmă, iar cele patru degete întinse să indice sensul curentului electric, atunci degetul mare, poziționat lateral sub unghi drept față de celelalte în planul palmei, indică sensul forței electromagnetice (*fig. 1.6, a*).

Regula dată a fost formulată de către fizicianul englez John A. Fleming (1849–1945) și, datorită acestui fapt, îi poartă numele.

În cazul în care inducția magnetică $\vec{B}$ nu este perpendiculară pe conductor, formând cu el un unghi arbitrar α, vectorul $\vec{B}$ se descompune în două componente: $\vec{B}_{\parallel}$ – paralelă cu conductorul și $\vec{B}_{\perp}$ – perpendiculară pe el (*fig. 1.6, b*). Așadar, acțiunea mag-

netică asupra conductorului este efectuată numai de componenta $\vec{B}_\perp$. Respectiv, forţa electromagnetică: $F_m = IlB_\perp$. Studiind *figura 1.6*, *b*, observăm că $B_\perp = B \sin \alpha$. Astfel, obţinem expresia generală a forţei electromagnetice

$$F_m = IlB_\perp = IlB \sin \alpha. \qquad (1.3)$$

La determinarea sensului forţei $\vec{F}_m$, în acest caz, folosim regula mâinii stângi cu o singură deosebire: în palmă intră componenta $\vec{B}_\perp$ a inducţiei magnetice.

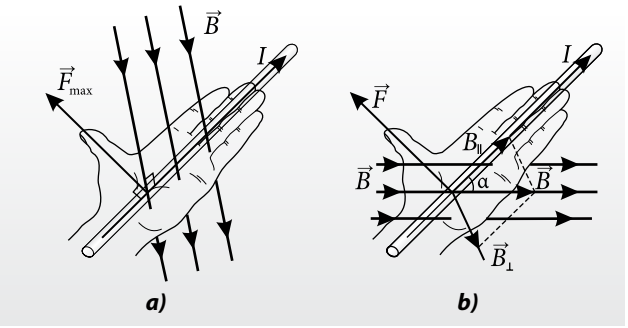



*Fig. 1.6*

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Cum se defineşte modulul inducţiei câmpului magnetic? Care este unitatea acesteia?
2. Cum poate fi determinată direcţia şi sensul forţei electromagnetice?
3. Ce factori determină valoarea forţei care acţionează din partea câmpului magnetic asupra unei porţiuni de conductor parcurs de curent electric?
4. Un conductor rectiliniu cu lungimea de 0,6 m se află într-un câmp magnetic omogen, perpendicular pe liniile de inducţie ale acestuia. Care este inducţia câmpului ce ar acţiona asupra conductorului cu o forţă de 0,15 N la o intensitate a curentului în el egală cu 2,5 A?
5. O porţiune a unui conductor parcurs de curent electric se află într-un câmp magnetic omogen. La intensitatea curentului prin conductor, egală cu 2,4 A, asupra acestei porţiuni acţionează o forţă electromagnetică de 0,48 N. Ce forţă ar acţiona asupra acestei porţiuni dacă, fără a schimba poziţia ei, intensitatea curentului în ea ar deveni egală cu 3,6 A?
6. Un conductor ce formează un unghi de 30° cu liniile de inducţie ale câmpului magnetic este parcurs de un curent electric cu intensitatea de 1,2 A. Determinaţi valoarea forţei electromagnetice care acţionează asupra porţiunii de conductor cu lungimea de 0,75 m, dacă inducţia magnetică este egală cu 0,8 T.
7.* Un conductor cu masa de 8 g şi lungimea de 20 cm, suspendat orizontal de două fire metalice subţiri, se află în câmp magnetic orizontal, fiind perpendicular pe liniile de inducţie magnetică ale acestuia. Determinaţi forţa de tensiune a fiecărui fir în cazul în care prin conductor circulă curent cu intensitatea de 3 A, iar inducţia magnetică este egală cu 0,05 T. Analizaţi cazurile posibile.
8. Elaboraţi planul lucrării de laborator „Studiul acţiunii câmpului magnetic asupra curentului electric" în baza experimentului din *figura 1.5*. Realizaţi lucrarea şi formulaţi concluziile.

## 1.3. ACŢIUNEA CÂMPULUI MAGNETIC ASUPRA SARCINILOR ELECTRICE ÎN MIŞCARE. FORŢA LORENTZ

Câmpul magnetic acţionează asupra conductorului parcurs de curent cu forţa electromagnetică $F_m = IlB \sin \alpha$ (1.3). Curentul electric reprezintă mişcarea ordonată a particulelor încărcate (a sarcinilor electrice). Evident, forţa electromagnetică ce acţionează asupra conductorului parcurs de curent este rezultanta forţelor exercitate asupra tuturor particulelor încărcate ce se mişcă ordonat în porţiunea respectivă a conductorului.

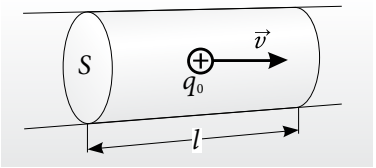



*Fig. 1.7*

Să exprimăm intensitatea curentului electric din conductor prin caracteristicile purtătorilor de sarcină ce se mişcă ordonat cu viteza $\vec{v}$ prin el. Considerăm porţiunea de conductor de lungime $l$ şi aria secţiunii transversale $S$ (*fig. 1.7*). Notăm cu $n$ concentraţia purtătorilor de sarcină şi cu $q_0$ valoarea sarcinii electrice a unuia din ei. Atunci numărul de purtători din porţiunea luată $N = nV = nlS$, iar sarcina electrică totală a lor $q = q_0N = q_0nlS$. Purtătorii de sarcină parcurg lungimea porţiunii în

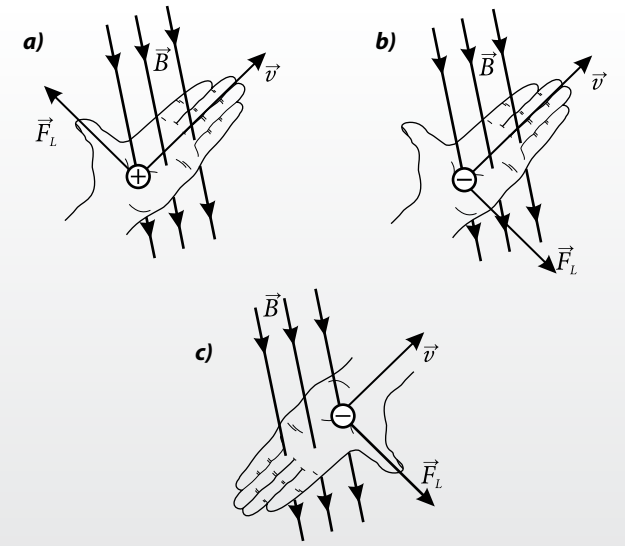



*Fig. 1.8*

timpul $t = \frac{l}{v}$ și transportă sarcina $q$ prin secțiunea transversală a conductorului. Intensitatea curentului electric în acesta este

$$I = \frac{q}{t} = q_0 n v S. \qquad (1.4)$$

Substituind (1.4) în (1.3), obținem $F_m = q_0 v n S l B \sin \alpha$.

Introducând $N = nSl$, obținem $F_m = q_0 vNB \sin \alpha$.

**Forța ce acționează asupra unei particule din partea câmpului magnetic în care se mișcă, numită *forța Lorentz*, este**

$$F_L = \frac{F_m}{N} = q_0 vB \sin \alpha. \qquad (1.5)$$

În formula (1.3) unghiul α este unghiul dintre sensul curentului electric și vectorul inducției magnetice $\vec{B}$. În cazul în care sarcina electrică a purtătorilor este pozitivă, sensul curentului coincide cu sensul vitezei $\vec{v}$ a sarcinilor. Prin urmare, în cazul sarcinilor pozitive, unghiul α este unghiul format de vectorii $\vec{v}$ și $\vec{B}$. Forța electromagnetică $\vec{F}_m$ este perpendiculară pe direcția conductorului și pe vectorul $\vec{B}$. Deci forța Lorentz este perpendiculară pe ambii vectori: $\vec{v}$ și $\vec{B}$.

Sensul forței ce acționează asupra particulei încărcate cu sarcină pozitivă poate fi ușor determinat aplicându-se **regula mâinii stângi**:

> Așezăm palma astfel încât liniile de inducție magnetică să intre în palmă, iar cele patru degete întinse să fie orientate în sensul vectorului vitezei. Atunci degetul mare, poziționat lateral sub un unghi drept față de celelalte în planul palmei, indică sensul forței Lorentz (*fig. 1.8, a*).

Dacă însă sarcina electrică a particulei este negativă, sensul forței Lorentz poate fi determinat în baza aceleiași reguli pe două căi: așezăm palma ca și în cazul sarcinii pozitive și considerăm sensul forței opus celui indicat de degetul mare (*fig. 1.8, b*) sau orientăm degetele întinse în sens contrar vitezei și considerăm drept sens al forței cel indicat de degetul mare (*fig. 1.8, c*).

Forța Lorentz permanent este perpendiculară pe viteza particulei încărcate, deci și pe direcția deplasării ei. Prin urmare, lucrul mecanic al ei este nul. Din mecanică se știe că variația energiei cinetice a particulei este egală cu lucrul forțelor ce acționează asupra ei. În cazul de față, lucrul este nul și variația energiei cinetice este nulă. **Energia cinetică, deci și modulul vitezei particulei încărcate ce se mișcă în câmp magnetic, nu variază, ci rămân constante.** Câmpul magnetic nu modifică valoarea vitezei particulei, dar influențează numai direcția ei. Adică *mișcarea sarcinii electrice în câmp magnetic este o mișcare uniformă.*

HENDRIK ANTOON LORENTZ
(1853–1928)
*fizician, teoretician olandez*

A dezvoltat teoria câmpului electromagnetic a lui Maxwell, punând la bază caracterul corpuscular al particulelor încărcate și precizând ecuațiile Maxwell–Lorentz pentru câmpul electromagnetic în medii. A stabilit relația dintre indicele de refracție al substanței și densitatea ei, dintre indicele de refracție și frecvența undei incidente. A dedus expresia pentru forța ce acționează asupra particulei încărcate din partea câmpului electromagnetic în care se mișcă, cunoscută sub denumirea de *forța Lorentz*.

A prezis influența câmpului magnetic asupra radiației atomilor, descoperită experimental (a. 1896) de către Pieter Zeeman (1865–1943), unul dintre elevii săi, și cunoscută ca „efectul Zeeman". Pentru aceste lucrări li s-a decernat Premiul Nobel în domeniul fizicii (a. 1902).

Lorentz a dedus (a. 1904) formulele care leagă coordonatele spațiale și momentele de timp ale unuia și aceluiași eveniment în două sisteme de referință inerțiale diferite, numite apoi *transformările lui Lorentz*.

În anul 1918, Lorentz a prezidat Comitetul științific având sarcina de a elabora construcția digului de la Zuiderzee, care permitea asanarea unui teritoriu mare – o problemă de importanță deosebită pentru Olanda.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce factori determină valoarea forţei care acţionează din partea câmpului magnetic asupra sarcinii electrice ce se mişcă în el?
2. Cum se determină direcţia şi sensul forţei Lorentz?
3. Care este proprietatea principală a mişcării particulelor încărcate în câmp magnetic?
4. Un proton se mişcă cu viteza de $5 \cdot 10^6$ m/s într-un câmp magnetic omogen a cărui inducţie magnetică este egală cu 0,04 T. Determinaţi valoarea maximă a forţei ce acţionează asupra protonului din partea acestui câmp. Care este valoarea forţei în cazul în care viteza protonului ar forma un unghi de 60° cu vectorul inducţiei magnetice? Sarcina protonului $q_p = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C.
5.* Un electron, având energia cinetică egală cu $4{,}55 \cdot 10^{-19}$ J, intră într-un câmp magnetic omogen de inducţie egală cu 0,3 T, perpendicular pe liniile magnetice. Determinaţi acceleraţia imprimată electronului de câmpul magnetic. Masa electronului $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, sarcina electrică $|q_e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

## 1.4. MIŞCAREA PARTICULELOR ÎNCĂRCATE ÎN CÂMP MAGNETIC

Considerăm o particulă încărcată cu sarcina electrică $q$ care intră cu viteza $\vec{v}$ într-un *câmp magnetic omogen* de inducţie $\vec{B}$. Să cercetăm cazuri concrete de orientare a vectorului $\vec{v}$ faţă de inducţia $\vec{B}$.

În cazul în care la intrarea în câmpul magnetic viteza $\vec{v}$ are direcţia vectorului $\vec{B}$, unghiul $\alpha = 0$ sau 180°, adică $\sin \alpha = 0$. Din expresia (1.5) rezultă că forţa Lorentz $F_L = 0$, deci câmpul magnetic nu acţionează asupra particulei încărcate. Aceasta nu-şi modifică viteza $\vec{v}$, se mişcă rectiliniu uniform de-a lungul liniei de inducţie magnetică.

Admitem că particula încărcată pătrunde în câmpul omogen cu viteza $\vec{v}$ perpendiculară pe vectorul $\vec{B}$ al inducţiei magnetice. În acest caz $\alpha = 90°$ şi $\sin \alpha = 1$. Forţa Lorentz are valoare maximă $F_L = qvB$ şi imprimă particulei încărcate acceleraţia

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{q}{m} vB. \qquad (1.6)$$

După cum s-a menţionat în *tema 1.3*, forţa Lorentz este perpendiculară atât pe vectorul $\vec{B}$, cât şi pe cel al vitezei $\vec{v}$, prin urmare, şi acceleraţia este perpendiculară pe aceşti vectori. În concluzie, traiectoria particulei este o curbă plană situată în planul perpendicular pe vectorul inducţiei magnetice $\vec{B}$.

Unica mişcare în care viteza şi acceleraţia mobilului posedă aceste proprietăţi este mişcarea circulară uniformă. În ea acceleraţia caracterizează rapiditatea variaţiei direcţiei vitezei, este orientată spre centrul cercului pe care se mişcă punctul material (*fig. 1.9*), poartă numele de **acceleraţie centripetă** şi are valoarea $a = v^2/r$, unde $r$ este raza cercului.

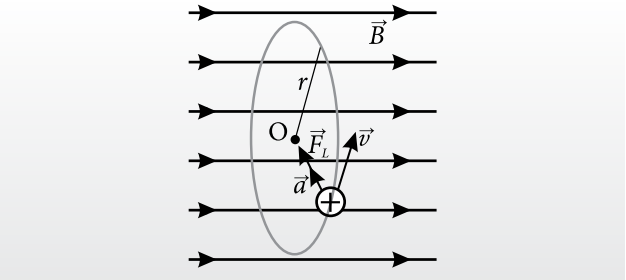



*Fig. 1.9*

Egalând această valoare cu (1.6), exprimăm raza cercului:

$$r = \frac{mv}{qB}. \qquad (1.7)$$

Pentru perioada de rotaţie a particulei încărcate în câmp magnetic obţinem:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \qquad (1.8)$$

Observăm că perioada de rotaţie $T$ depinde doar de natura particulei (de masa ei $m$ şi sarcina electrică $q$), precum şi de inducţia magnetică $B$, însă nu depinde de viteza particulei încărcate: la viteze mai mari ea parcurge în acelaşi timp cercuri de raze mai mari. Această proprietate se manifestă doar dacă vitezele particulelor $v$ au valori mult mai mici decât viteza luminii în vid $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. La valori ale vitezei $v$ care se apropie de $c$, masa particulelor nu mai rămâne constantă, depinzând de viteză. La creşterea vitezei ea se măreşte. (*Mişcarea la viteze $v \to c$ este explicată detaliat în capitolul 4.*) Evident, în aceste condiţii perioada de rotaţie nu rămâne constantă, ci variază în funcţie de viteză.

Mişcarea particulelor încărcate în câmp magnetic pe traiectorii circulare are diverse aplicaţii practice. Să analizăm cele mai importante dintre ele.

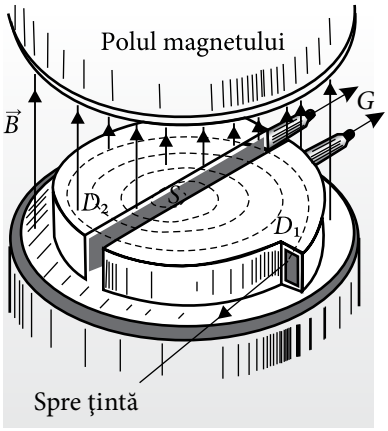



*Fig. 1.10*

**1. Ciclotronul** este un accelerator ciclic utilizat în cercetările din domeniul fizicii nucleare pentru a imprima viteze mai mari particulelor încărcate grele (protoni, nuclee ale atomilor de heliu ș.a.), în scopul studierii interacţiunii acestora cu substanţa. A fost inventat în 1930 de către savantul american Ernest Orlando Lawrence (1901–1958).

Schema de principiu a ciclotronului este prezentată în *figura 1.10*. Cu $D_1$ şi $D_2$ sunt notaţi duanţii – două cavităţi semicilindrice de forma literei *D*. Duanţii sunt conectaţi la un generator *G* de tensiune electrică alternativă, de frecvenţă înaltă. Astfel, în spaţiul dintre duanţi, asupra particulelor încărcate acţionează un câmp electric (în interiorul duantului acest câmp lipsește). În spaţiul dintre duanţi, aproape de centrul lor, se află sursa *S* de particule încărcate. Această parte a instalaţiei se află într-o cutie etanșă (în figură nu este indicată), din care s-a scos aerul pentru a evita ciocnirile dintre particulele încărcate şi moleculele din componenţa lui. Cutia este situată între polii unui electromagnet puternic.

Considerăm o particulă încărcată emisă de sursă, care sub acţiunea câmpului electric din spaţiul dintre duanţi intră în duantul $D_1$. Asupra particulei încărcate acţionează numai câmpul magnetic care o determină să se mişte pe un arc de cerc. La ieşirea din duantul $D_1$, sensul câmpului electric este schimbat în opus, astfel încât particula este accelerată şi intră în duantul $D_2$ cu viteză mărită. Raza semicercului descris de ea în acest duant este mai mare decât în cel precedent. La ieşirea din duantul $D_2$ sensul câmpului electric dintre duanţi este iarăşi schimbat în opus, particula este accelerată din nou, intră în duantul $D_1$ cu o viteză şi mai mare, este mai mare de asemenea şi raza semicercului descris de ea sub influenţa câmpului magnetic etc. În concluzie, particula încărcată descrie o traiectorie de forma unei „spirale”, iar la trecerea dintr-un duant în altul viteza ei se măreşte. Evident, procesul de accelerare continuă are loc numai dacă particula încărcată ieşită dintr-un duant ajunge de fiecare dată în câmp electric care o accelerează spre celălalt duant. Pentru aceasta perioada de rotaţie a particulei încărcate în câmp magnetic trebuie să fie egală cu perioada de variaţie a tensiunii electrice alternative care alimentează duanţii. Fasciculul de particule accelerate este scos din ciclotron şi îndreptat spre ţinta respectivă, interacţiunea cu care este cercetată de savanţi.

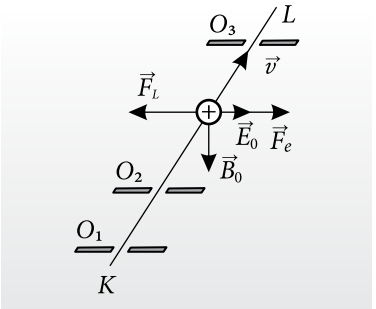



*Fig. 1.11*

**2. Spectrograful de masă** este instalaţia destinată determinării maselor particulelor încărcate după raza arcului descris de ele la mişcarea în câmp magnetic. Din formula (1.7) exprimăm masa

$$m = \frac{qBr}{v}. \qquad (1.9)$$

Pentru a determina viteza particulelor încărcate, acestea trec printr-un filtru special de viteze în care particulele accelerate se mişcă prin câmpuri electrice şi magnetice reciproc perpendiculare (*fig. 1.11*). Orificiile $O_1$ şi $O_2$ evidenţiază un fascicul de particule încărcate care se propagă cu viteze diferite în direcţia *KL*. În spaţiul dintre orificiile $O_2$ şi $O_3$ asupra lor acţionează simultan două forţe perpendiculare pe direcţia vitezei particulelor, forţe cu dreapta-suport comună şi sensuri opuse: forţa $\vec{F}_e = q\vec{E}_0$ din partea câmpului electric de intensitate $\vec{E}_0$ şi forţa Lorentz de valoare $F_L = qvB_0$ din partea câmpului magnetic de inducţie $B_0$. Prin orificiul $O_3$ vor ieşi particulele care se mişcă rectiliniu, adică cele ce se mişcă cu

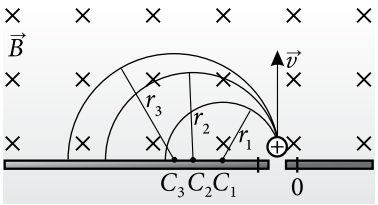



*Fig. 1.12*

viteza $v$ ce corespunde egalității modulelor forțelor, $F_L = F_e$. Prin urmare, $qvB_0 = qE_0$. Astfel, prin orificiul $O_3$ ies particule cu o viteză bine determinată:

$$v = \frac{E_0}{B_0}. \qquad (1.10)$$

Particulele încărcate intră într-un alt câmp magnetic cu aceste viteze perpendiculare pe vectorul de inducție $\vec{B}$ și se mișcă pe semicercuri de raze $r$ (*fig. 1.12*). Valorile razelor variază în funcție de masele particulelor: cele cu masă mai mare se deplasează pe semicercuri de rază mai mare. Căzând pe un film fotografic, ele lasă urme în locurile respective. Cunoscând inducția $B$, sarcina particulei $q$ și măsurând raza $r$, din formulele (1.9) și (1.10) se determină masa ei.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Poate oare o particulă încărcată să se miște uniform rectiliniu într-un câmp magnetic omogen? În ce condiții?
2. Care sunt parametrii ce determină valoarea razei cercului descris de particula încărcată într-un câmp magnetic omogen? Dar a perioadei de rotație?
3. Ce condiție trebuie satisfăcută pentru a asigura accelerarea continuă a particulelor încărcate în ciclotron?
4. Un electron intră într-un câmp magnetic omogen cu viteza de $2 \cdot 10^6$ m/s, orientată perpendicular pe liniile de inducție magnetică, și descrie un arc de cerc cu raza de 4,55 mm. Determinați valoarea inducției câmpului magnetic. Se cunosc: $m_e$=9,1·10$^{-31}$ kg, $|q_e|$ = 1,60·10$^{-19}$ C.
5. Care trebuie să fie raza minimă a duanților unui ciclotron ce ar permite accelerarea protonilor până la energii cinetice egale cu $8 \cdot 10^{-13}$ J? Inducția câmpului magnetic din ciclotron este egală cu 0,26 T. În timpul accelerării masa protonului se va considera constantă și egală cu 1,67 · 10$^{-27}$ kg.

## 1.5.* PROPRIETĂȚILE MAGNETICE ALE SUBSTANȚEI. PERMEABILITATEA RELATIVĂ

### Să ne amintim

Pentru a studia tema dată, ne aducem aminte despre influența dielectricului asupra câmpului electric în care este introdus. Ne imaginăm un condensator plan cu vid (aer) încărcat cu sarcina electrică $q_0$. Notăm cu $\vec{E}_0$ intensitatea câmpului electric dintre armături. Introducem în condensator un dielectric care umple tot spațiul dintre armături. Toate sarcinile electrice ale dielectricului sunt ***sarcini legate***, ele se pot deplasa doar în limitele moleculei (ale atomului). Sub influența câmpului electric exterior se produce o rearanjare a sarcinilor legate, ele se deplasează întrucâtva spre armăturile cu sarcini de semne opuse ale condensatorului. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de **polarizare a dielectricului**. În consecință, pe fețele dielectricului se află sarcinile electrice legate de semne opuse celor de pe armăturile învecinate ale condensatorului și diminuează câmpul electric al acestora. Respectiv, intensitatea câmpului electric în dielectric $E$ devine mai mică decât în vid ($E_0$).

Mărimea fizică $\varepsilon_r$ care arată de câte ori intensitatea câmpului electric în vid este mai mare decât intensitatea câmpului în același loc după introducerea dielectricului în el se numește **permitivitate relativă a substanței** $\varepsilon_r = \frac{E_0}{E}$ sau $E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$. Sub formă vectorială

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon_r}. \qquad (1.11)$$

Evident, mărimea adimensională $\varepsilon_r > 1$.

Să analizăm influența substanței asupra câmpului magnetic în care este introdusă. Primul savant care a abordat această problemă a fost Ampère. El a pornit de la faptul că substanța este formată din molecule (atomi) și a admis că în ele există curenți electrici circulari, numiți **curenți moleculari**, ale căror câmpuri magnetice sunt similare celor ale unor bare magnetice minuscule (*fig. 1.3*, pag. 6).

Această ipoteză a lui Ampère a fost foarte îndrăzneață pentru timpul său, precedând cu circa 90 de ani stabilirea modelului planetar al atomului. În conformitate cu acest model, în centrul atomului se află nucleul în care este localizată practic toată masa atomului și este încărcat cu sarcină electrică pozitivă, iar în jurul lui se mișcă electronii. Din punct de vedere electric, această mișcare este

echivalentă cu existenţa unor curenţi electrici circulari elementari.

Pentru simplitate, admitem existenţa în moleculă (atom) doar a unui curent circular al cărui câmp magnetic este echivalent cu câmpul creat de toţi electronii ce se mişcă în moleculă. Acest curent este **curentul molecular**, a cărui intensitate se notează cu $I_{mol}$. Având în vedere că în jurul nucleului se mişcă mai mulţi electroni, este posibilă situaţia în care intensitatea curentului molecular este nulă: $I_{mol} = 0$.

Substanţele formate din molecule (atomi) în care există curenţi moleculari ($I_{mol} \neq 0$) sunt numite **paramagnetici**, iar cele formate din molecule caracterizate de $I_{mol} = 0$ sunt numite **diamagnetici**.

Să analizăm influenţa acestor substanţe asupra câmpului magnetic în care sunt introduse.

Ne imaginăm un solenoid prin ale cărui spire circulă un curent electric de intensitate $I_0$. Notăm cu $\vec{B}_0$ inducţia câmpului magnetic din interiorul solenoidului, al cărei sens se determină în conformitate cu regula burghiului (v. *fig. 1.4*). Menţionăm că în partea centrală a solenoidului câmpul magnetic este aproximativ omogen (*fig. 1.13*). Introducem în interiorul solenoidului, coaxial cu el, un cilindru din substanţă paramagnetică. Câmpul magnetic al solenoidului orientează „magneţii" moleculelor în sensul inducţiei $\vec{B}_0$, iar curenţii moleculari $I_{mol}$ circulă în sensul curentului de intensitate $I_0$ din spirele solenoidului (*fig. 1.14*). Distribuţia curenţilor într-o secţiune transversală a solenoidului şi a cilindrului paramagnetic este reprezentată în *figura 1.15*.

Observăm că în partea interioară a paramagneticului curenţii moleculari vecini circulă în sensuri opuse, iar la suprafaţa lui toţi curenţii au unul şi acelaşi sens – cel al curentului din solenoid. Inducţiile magnetice ale câmpurilor respective au acelaşi sens, deci inducţia magnetică $\vec{B}$ în paramagnetic este mai mare în modúl decât inducţia magnetică în vid $\vec{B}_0$, adică

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0, \qquad (1.12)$$

unde $\mu_r \equiv \mu_r^{para} > 1$.

Mărimea adimensională $\mu_r$ care arată de câte ori inducţia magnetică în substanţă este mai mare în modúl decât inducţia magnetică în vid, până la introducerea substanţei în locul dat, este numită **permeabilitate relativă a substanţei**. Paramagneticii amplifică câmpul magnetic în care sunt introduşi.

Cu totul alta este situaţia în cazul substanţelor diamagnetice. În lipsa câmpului magnetic exterior, curenţii moleculari sunt nuli: $I_{mol} = 0$. La introducerea acestor substanţe în câmp magnetic exterior, mişcarea electronilor din molecule se modifică, astfel încât apar curenţi moleculari care circulă în sens contrar celui din spirele solenoidului. Ca rezultat, inducţia câmpului magnetic în diamagnetic este mai mică decât era în locul respectiv până la introducerea în el a substanţei. Astfel, pentru diamagnetici permeabilitatea relativă $\mu_r \equiv \mu_r^{dia} < 1$.

În tabelul de mai jos sunt incluse valorile permeabilităţii relative pentru câteva substanţe.

**Permeabilitatea relativă**

| Paramagneticul | $\mu_r$ | Diamagneticul | $\mu_r$ |
|---|---|---|---|
| Aluminiu | 1,000023 | Bismut | 0,999824 |
| Aer | 1,00000038 | Apă | 0,999991 |
| Oxigen | 1,0000019 | Cupru | 0,999990 |
| Wolfram | 1,000176 | Sticlă | 0,999987 |

Din analiza tabelului constatăm că permeabilitatea relativă a acestor substanţe diferă foarte puţin de 1, prin urmare ele au proprietăţi magnetice nesemnificative.

Există câteva metale – fierul (Fe), gadoliniul (Gd), cobaltul (Co), nichelul (Ni) – şi aliajele acestora care sunt caracterizate de proprietăţi magnetice deosebite. Ele poartă numele de **feromagnetici**, deoarece fierul este cel mai răspândit şi posedă proprietăţi mai pronunţate. Permeabilitatea relativă a lor are valori destul de mari, de până la $\mu_r = 8\,000$, adică de atâtea ori amplifică câmpul magnetic şi acţiunile lui.

Feromagneticii se utilizează pe larg în ***electromagneţi***. Aceştia prezintă bobine de sârmă izolată înfăşurată în unul sau mai multe straturi, în interiorul cărora se află un miez din substanţă feromagnetică. Substanţa se alege astfel încât la întreruperea curentului electric în bobine să dispară proprietatea de atracţie magnetică.

Electromagneţii au un domeniu vast de aplicabilitate, inclusiv în ***relee electromagnetice***. (Anumite aplicaţii ale electromagneţilor vă sunt cunoscute de la orele de fizică din clasa a VIII-a.)

Unele substanţe (aliaje) feromagnetice rămân magnetizate şi atunci când intensitatea curentului în bobină devine nulă, adică rămân magnetizate şi în lipsa câmpului magnetic exterior. Această stare de magnetizare este numită **remanentă**. Ea este caracteristică pentru magneţii permanenţi. Drept exemplu sunt magneţii în formă de bară sau de potcoavă şi ácele magnetice folosite în busole.

Magneţii permanenţi sunt părţi componente ale unor aparate electrice de măsurat, de exemplu, ale celor **magnetoelectrice**. Ele reprezintă un magnet în formă

de potcoavă, între ai cărui poli se poate roti uşor un cadru (o bobină) parcurs(ă) de curentul măsurat (*fig. 1.16*). La polii magnetului sunt fixate capetele (*1*) prelucrate astfel încât între ele, cilindru (*2*) şi bobină (*3*) să rămână spaţii înguste. Pe axul bobinei este întărit acul indicator (*4*) şi capetele unor arcuri spiralate (*5*) care menţin bobina astfel încât o pereche de laturi ale ei să fie paralele liniilor de inducţie magnetică. Atunci când prin bobină circulă curent electric, în conductoarele din ea, situate paralel generatoarelor cilindrului, curenţii au sensuri opuse. Forţele ce acţionează asupra acestor conductoare din partea câmpului magnetic la fel au sensuri opuse şi rotesc bobina până în poziţia în care aceste forţe electromagnetice sunt echilibrate de forţele elastice din arcurile spiralate. La o intensitate mai mare a curentului din bobină, forţele, deci şi unghiul de rotaţie a acului indicator, vor fi mai mari.

Aparatele de acest tip pot fi folosite numai la măsurători în curent continuu.

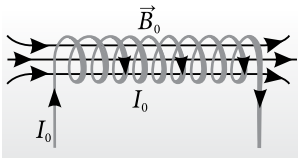



Fig. 1.13

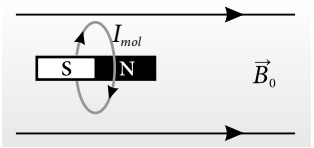



Fig. 1.14

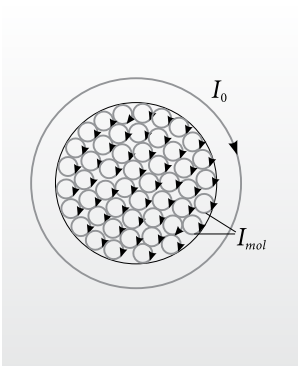



Fig. 1.15

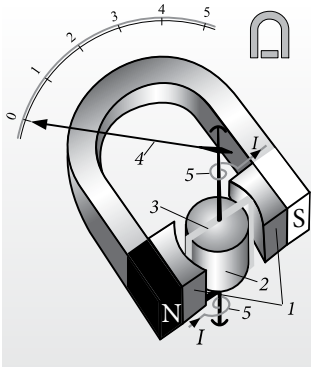



Fig. 1.16

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care este sensul fizic al permeabilităţii relative a substanţei? Ce valori are ea pentru paramagnetici? diamagnetici? feromagnetici?
2. Ce subînţelegem prin magnetism remanent?
3. Ce proprietăţi trebuie să posede miezul unui electromagnet?
4. Propuneţi construcţia unui aparat electric de măsurat în care ar fi folosită atracţia feromagnetului de bobina parcursă de curent electric.
5. Scrieţi un referat la tema: „Aplicaţii practice ale electromagneţilor".

## 1.6. INDUCŢIA ELECTROMAGNETICĂ

Descoperirea de către Oersted, în anul 1820, a existenţei câmpului magnetic în jurul conductoarelor parcurse de curent a pus în evidenţă legătura dintre fenomenele electrice şi magnetice. Dacă conductorul parcurs de curent electric creează în jurul său câmp magnetic, atunci de ce n-ar fi posibil să se obţină electricitate cu ajutorul câmpului magnetic? Această ipoteză a fost formulată pentru prima dată de către Michael Faraday în anul 1821. În urma mai multor experimente realizate cu magneţi şi bobine pe parcursul a zece ani, cercetările lui s-au încununat de succes. Astfel, în anul 1831, Faraday a descoperit **inducţia electromagnetică**.

### a. Fenomenul inducţiei electromagnetice. Aplicaţii practice

Schema experimentului în care Faraday a obţinut curent electric cu ajutorul câmpului magnetic este

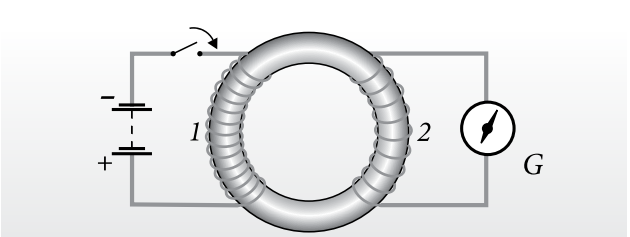
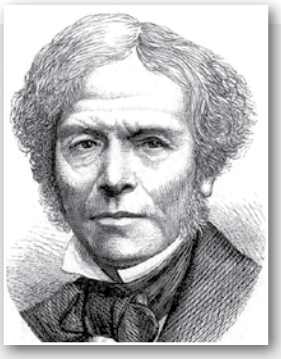



Fig. 1.17

prezentată în *figura 1.17*. El a confecţionat un inel din fier de aproximativ 2 cm grosime şi 15 cm în diametru şi a înfăşurat pe acesta două bobine din sârmă de cupru. A conectat bobina (*1*) la o sursă puternică de curent continuu, care genera în interiorul ei un câmp magnetic, amplificat de miezul de fier, iar circuitul bobinei (*2*) l-a închis printr-un galvanometru sensibil *G* pentru înregistrarea existenţei curentului de intensitate mică. În urma acestui experiment, Faraday a observat că la închiderea circuitului bobinei (*1*) acul indicator al galvanometrului din circuitul bobinei (*2*)



MICHAEL FARADAY
(1791–1867)
*fizician și chimist englez*

Primele sale cercetări științifice țin de domeniul chimiei, dintre care cele mai importante sunt experimentele legate de lichefierea gazelor. În anul 1821, Faraday face prima sa descoperire în domeniul electromagnetismului, construind modelul primului motor electric. Descoperă în 1831 fenomenul inducției electromagnetice, iar în 1833 – legile electrolizei, care au avut nu numai importanță practică, dar au confirmat și concepția despre natura discretă a cantității de electricitate. A introdus în fizică un șir de noțiuni noi: mobilitatea purtătorilor de sarcină (a. 1827), catod, anod, ioni, electroliză, electroliți, electrozi (a. 1834). A descoperit polarizarea dielectricilor și a introdus noțiunea de permitivitate electrică (a. 1837). În anul 1843 a demonstrat experimental legea conservării sarcinii electrice. A pus bazele teoriei diamagnetismului (a. 1845), a paramagnetismului (a. 1847) și a introdus noțiunea de câmp.
În cinstea lui Faraday, unitatea capacității electrice în Sistemul Internațional de Unități a fost numită *farad*.

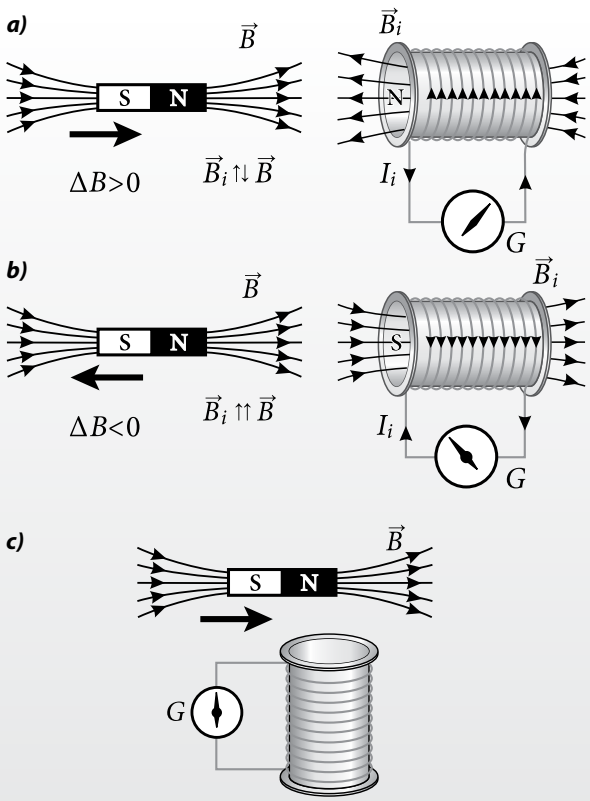



*Fig. 1.18*

deviază brusc, apoi revine rapid la poziția inițială. Același comportament al acului indicator a fost observat și la întreruperea circuitului bobinei (*1*), însă deviația bruscă se producea în sens opus celei precedente. Întrucât la închiderea (întreruperea) circuitului bobinei (*1*) intensitatea curentului crește (descrește) până la stabilirea valorii maxime (nule), inducția câmpului magnetic din bobina (*2*) variază în același mod, adică se mărește până la o valoare maximă sau se micșorează până la zero. Astfel, Faraday a ajuns la concluzia că pentru obținerea curentului în circuitul bobinei (*2*) este necesară existența unui câmp magnetic variabil. Acest curent a fost numit **curent de inducție** sau **curent indus**, iar fenomenul de generare a curentului electric cu ajutorul câmpului magnetic – **inducție electromagnetică**.

Pentru stabilirea condițiilor de apariție a curentului de inducție, Faraday a efectuat un șir de alte experimente, pe care le vom analiza în continuare.

Într-o bobină cu multe spire, conectată la galvanometrul *G,* este introdus sau înlăturat în diferite moduri un magnet-bară (*fig. 1.18, a, b*). Se constată că acul indicator al galvanometrului deviază numai în timpul mișcării magnetului de-a lungul axei bobinei și revine la poziția zero când acesta se oprește. Cu cât viteza de mișcare a magnetului este mai mare, cu atât deviația acului galvanometrului este mai bruscă, deci intensitatea curentului de inducție este mai mare. Dacă însă magnetul se mișcă într-un plan perpendicular pe axa bobinei, atunci galvanometrul nu înregistrează existența curentului de inducție (*fig. 1.18, c*). Aceleași rezultate se obțin și atunci când în experimentele reprezentate schematic în *figura 1.18* magnetul este imobil, iar bobina se mișcă. În concluzie, **curentul de inducție ia naștere doar în cazul mișcării relative a magnetului și a bobinei.**

Menționăm că magnetul permanent din experimentele precedente poate fi înlocuit cu un solenoid prin care circulă curentul continuu de intensitate *I*.

Fenomenul inducției electromagnetice are nu numai importanță științifică fundamentală, dar și numeroase aplicații practice. El se află la baza construcției generatoarelor de curent alternativ și continuu, a motoarelor electrice, transformatoarelor, diferitor dispozitive electrotehnice și radiotehnice.

Există foarte multe aparate și dispozitive în care este folosită inducția electromagnetică. Ele se utilizează în diverse domenii, începând cu aparatele casnice

și terminând cu cele mai avansate tehnologii industriale. În cele ce urmează vom analiza construcţia şi principiul de funcţionare a câtorva dintre ele.

Unul dintre dispozitivele folosite pentru transformarea oscilaţiilor sonore în cele electrice este ***microfonul electrodinamic*** prezentat în *figura 1.19* în secţiune. El constă dintr-un magnet permanent (*1*) de formă cilindrică cu un miez situat la mijloc, astfel încât se obţine un spaţiu îngust (*2*) cu un câmp magnetic puternic, în care se poate deplasa liber bobina (*3*). Membrana (*4*) este legată cu bobina şi se mişcă împreună. Pentru asigurarea unei mobilităţi mai bune, marginile membranei sunt gofrate. Dacă la membrană ajung variaţiile de presiune ale aerului determinate de propagarea undelor sonore, atunci ea împreună cu bobina începe să oscileze în câmp magnetic. Drept urmare, în conformitate cu legea inducţiei electromagnetice, în bobină ia naştere o tensiune electromotoare (abreviat *t.e.m.*) de inducţie variabilă de aceeaşi frecvenţă cu cea a oscilaţiilor sonore. Cu cât oscilaţiile sonore au o amplitudine mai mare, cu atât mai mare este şi amplitudinea *t.e.m.* de inducţie variabilă.

Curenţii de inducţie care apar în conductoarele metalice masive aflate în câmp magnetic variabil sunt numiţi **curenţi turbionari** sau **curenţi Foucault** (în cinstea fizicianului francez J.B.L. Foucault (1819–1868) care i-a descoperit). Întrucât rezistenţa conductoarelor masive este mică, curenţii turbionari pot atinge valori foarte mari provocând o încălzire considerabilă a conductoarelor. Acest fenomen stă la baza funcţionării ***cuptoarelor de inducţie***. Elementul de bază al unui cuptor de inducţie este o bobină, numită **inductor**, prin care circulă curent alternativ. Corpul metalic, care trebuie prelucrat termic, se introduce în câmpul magnetic variabil al inductorului. În consecinţă, corpul de prelucrat este parcurs de curenţi turbionari de intensitate mare şi, încălzindu-se prin efect termic, atinge temperaturi foarte înalte. Variind frecvenţa câmpului magnetic, se modifică adâncimea la care pătrund curenţii turbionari.

## b. Fluxul câmpului magnetic. Regula lui Lenz

Pentru descrierea cantitativă a fenomenului inducţiei electromagnetice vom constata o trăsătură comună a tuturor experimentelor analizate în *subtema 1.6, a* – un număr variabil de linii de inducţie ale câmpului magnetic intersectează suprafaţa mărginită de spirele bobinei. În acest scop, vom introduce o mărime fizică nouă numită **flux magnetic**.

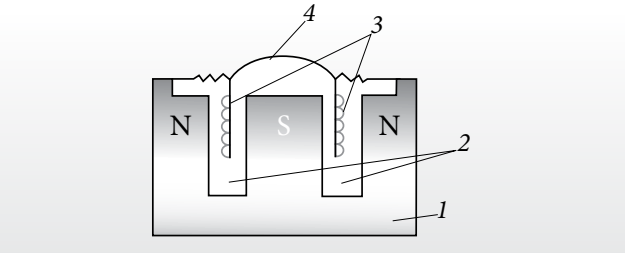



*Fig. 1.19*

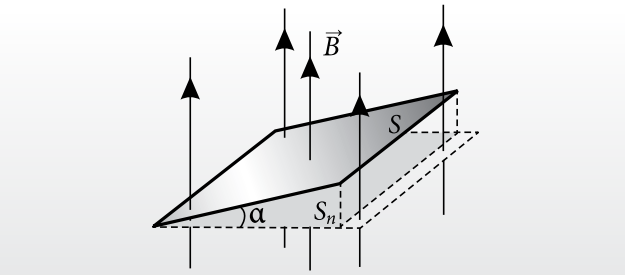



*Fig. 1.20*

Să examinăm o suprafaţă plană de arie *S* situată într-un câmp magnetic omogen de inducţie $\vec{B}$. Este evident că numărul liniilor magnetice ce intersectează suprafaţa *S* depinde de poziţia acesteia. Într-adevăr, numărul respectiv are valoarea maximă, dacă liniile de câmp sunt perpendiculare pe suprafaţa cercetată şi este egal cu zero, când ele sunt paralele cu planul suprafeţei *S*. Pentru o poziţie arbitrară a suprafeţei *S*, numărul liniilor magnetice ce o intersectează este egal cu cel ce intersectează proiecţia ei $S_n$ pe planul perpendicular liniilor (*fig. 1.20*). Dacă unghiul dintre suprafeţele *S* şi $S_n$ este α, atunci:

$$S_n = S \cos \alpha.$$

**Mărimea fizică Φ egală cu produsul dintre modulul vectorului inducţiei magnetice B şi aria proiecţiei $S_n$ a suprafeţei cercetate pe planul perpendicular vectorului $\vec{B}$ se numeşte *flux magnetic*:**

$$\Phi = BS_n \qquad (1.13)$$

sau

$$\Phi = BS \cos \alpha. \qquad (1.14)$$

Unitatea de flux magnetic în SI a fost numită **weber (Wb)** în cinstea fizicianului german Wilhelm Weber (1804–1891). Un Wb este fluxul magnetic al unui câmp magnetic omogen cu inducţia de 1T printr-o suprafaţă plană cu aria de 1 $m^2$, situată perpendicular pe direcţia câmpului magnetic:

$$1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2.$$

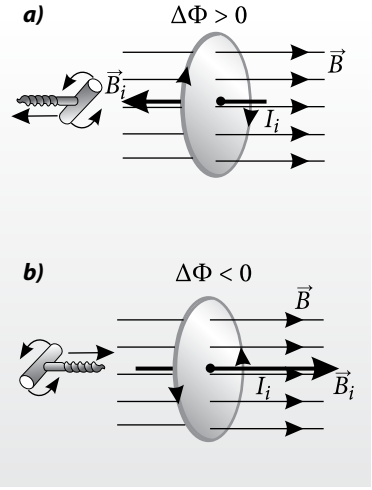



*Fig. 1.21*

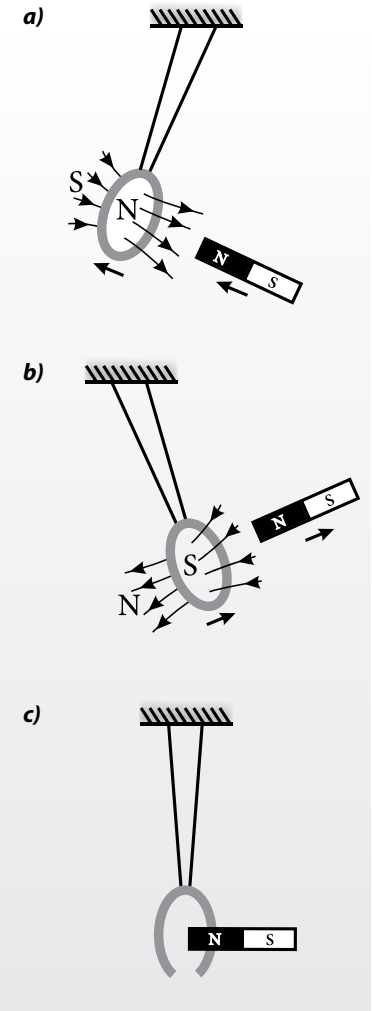



*Fig. 1.22*

Dacă într-un câmp magnetic omogen se află o bobină cu $N$ spire identice cu aria $S$, atunci fluxul magnetic prin această bobină este de $N$ ori mai mare decât cel printr-o spiră, adică

$$\Phi = NBS \cos \alpha. \qquad (1.15)$$

În anul 1833, analizând experimentele efectuate de Faraday referitoare la inducţia electromagnetică, Lenz a observat că variaţiile fluxului câmpului magnetic inductor $\Delta\Phi$ şi al celui indus $\Delta\Phi_i$ întotdeauna au semne opuse. De exemplu, la apropierea magnetului faţă de bobină (*fig. 1.18*), creşterea inducţiei câmpului magnetic inductor $\vec{B}$ determină o variaţie pozitivă $\Delta\Phi > 0$ a fluxului său magnetic. Concomitent, curentul de inducţie care ia naştere în bobină creează un câmp magnetic indus caracterizat de vectorul de inducţie $\vec{B}_i$, orientat astfel încât fluxul lui se opune variaţiei fluxului inductor: la apropierea magnetului $\Delta\Phi > 0$ şi $\vec{B}_i \uparrow\downarrow \vec{B}$, iar la îndepărtarea lui $\Delta\Phi < 0$ şi $\vec{B}_i \uparrow\uparrow \vec{B}$. Ştiind sensul vectorului $\vec{B}_i$ şi aplicând regula burghiului cu filet de dreapta, devine cunoscut sensul curentului de inducţie.

Aşadar, în baza observărilor sale asupra fenomenului inducţiei electromagnetice, Lenz formulează o regulă generală pentru determinarea sensului curentului de inducţie ce-i poartă numele:

> Curentul de inducţie are un astfel de sens, încât fluxul magnetic indus se opune variaţiei fluxului magnetic inductor.

Modul de aplicare a regulii lui Lenz este ilustrat în *figura 1.21, a, b*. În acest scop se realizează următoarele:

- se stabileşte cauza apariţiei curentului de inducţie şi semnul variaţiei fluxului magnetic inductor $\Delta\Phi$;
- se determină sensul vectorului $\vec{B}_i$: dacă $\Delta\Phi > 0$, atunci $\vec{B}_i \uparrow\downarrow \vec{B}$, iar dacă $\Delta\Phi < 0$, atunci $\vec{B}_i \uparrow\uparrow \vec{B}$;
- cu ajutorul regulii burghiului cu filet de dreapta aplicată vectorului $\vec{B}_i$ se stabileşte sensul curentului de inducţie.

Regula lui Lenz exprimă o proprietate fundamentală a oricăror sisteme fizice:

**O acţiune exterioară asupra oricărui sistem stimulează în interiorul lui procese care tind să atenueze rezultatele acestei acţiuni.**

Într-adevăr, în experimentele ilustrate în *figura 1.18*, acţiunea exterioară (variaţia fluxului magnetic prin efectuarea unui lucru mecanic pentru deplasarea magnetului) asupra sistemului (a bobinei) stimulează apariţia curentului de inducţie care formează câmpul magnetic indus. Interacţiunea polilor acestui câmp cu cei ai magnetului întotdeauna împiedică mişcarea lui. La apropierea magnetului interacţionează polii N–N şi apare o forţă de respingere (*fig. 1.18, a*), iar la îndepărtarea lui forţa de interacţiune a polilor N–S (*fig. 1.18, b*) este de atracţie.

Anume prin existenţa acestor forţe se explică următoarea experienţă, care serveşte drept o confirmare a regulii lui Lenz. Un inel uşor din cupru sau aluminiu este suspendat de două fire subţiri. Dacă încercăm să introducem un magnet în interiorul inelului, acesta începe să se deplaseze în acelaşi sens cu magnetul (*fig. 1.22, a*), iar la îndepărtarea magnetului,

inelul vine după el (*fig. 1.22*, *b*). Acest rezultat se explică simplu, considerând interacţiunea cu curentul de inducţie care ia naştere în inel. Dacă inelul are o tăietură (*fig. 1.22*, *c*), atunci curentul de inducţie nu circulă şi mişcarea inelului nu se observă. Când prin inel circulă curentul de inducţie, apare şi un câmp magnetic indus. Inelul parcă ar deveni şi el un magnet care interacţionează cu cel aflat în mişcare.

### c. Legea inducţiei electromagnetice. Tensiunea electromotoare de inducţie

Existenţa curentului de inducţie într-un circuit închis, ca şi a oricărui alt curent electric, este determinată de prezenţa în acest circuit a unei **tensiuni electromotoare**.

În baza experienţelor descrise în *subtema 1.6, a*, Faraday a constatat că această tensiune electromotoare de inducţie (*t.e.m.*) este cu atât mai mare cu cât fluxul magnetic care străbate circuitul închis variază mai rapid. Dacă în intervalul de timp $\Delta t$ fluxul magnetic se modifică cu $\Delta\Phi$, atunci *t.e.m.* de inducţie

$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (1.16)$$

Raportul $\Delta\Phi/\Delta t$ din această relaţie arată cât de repede variază fluxul magnetic şi este numit **viteză de variaţie a fluxului magnetic**, iar semnul „minus" corespunde regulii lui Lenz. Tensiunea electromotoare de inducţie dă naştere unui curent indus, al cărui câmp magnetic se opune variaţiei fluxului magnetic inductor, adică pentru $\Delta\Phi/\Delta t > 0$ avem $\mathscr{E}_i < 0$ şi invers, pentru $\Delta\Phi/\Delta t < 0$ avem $\mathscr{E}_i > 0$.

Relaţia (1.16) reprezintă o lege universală, numită **legea inducţiei electromagnetice (legea lui Faraday)**. Ea este valabilă întotdeauna, indiferent de forma circuitului străbătut de fluxul magnetic şi de módul în care se produce variaţia lui.

> ***Tensiunea electromotoare de inducţie*** **($\mathscr{E}_i$) într-un circuit închis este egală cu viteza de variaţie a fluxului magnetic prin suprafaţa mărginită de acest circuit luată cu semnul opus.**

Apariţia *t.e.m.* de inducţie şi a curentului indus demonstrează existenţa unui câmp electric care pune purtătorii de sarcină în mişcare ordonată.

*T.e.m.* de inducţie nu este localizată, adică nu este concentrată într-un anumit loc al circuitului. Ea poate fi detectată între oricare două puncte care delimitează o porţiune de conductor din circuitul străbătut de un flux magnetic variabil. Aşadar,

> **variaţia fluxului magnetic printr-un circuit închis conduce la apariţia unui câmp electric cu linii închise, adică *turbionar*.**

Din legea lui Faraday avem:

$$\Delta\Phi = -\mathscr{E}_i\Delta t.$$

Această formulă permite definirea unităţii de flux magnetic în alt mod.

> ***Un weber*** **(Wb) este fluxul magnetic printr-un contur închis, la micşorarea căruia până la zero în timp de 1 s în acest contur ia naştere o *t.e.m.* de inducţie de 1 V:**
>
> $$1\ \text{Wb} = 1\ \text{V}\cdot\text{s}.$$

Să analizăm mişcarea unui conductor rectiliniu de lungime $l$ într-un plan perpendicular pe liniile câmpului magnetic omogen de inducţie $\vec{B}$. Admitem că viteza $\vec{v}$ este constantă şi perpendiculară pe conductor (*fig. 1.23*). Împreună cu conductorul se vor deplasa cu viteza $\vec{v}$ electronii liberi şi ionii pozitivi ai acestuia. Fiecare purtător de sarcină se află sub acţiunea forţei Lorentz $F_L = qvB \sin 90^o = qvB$, orientată spre capetele conductorului, după cum este indicat în *figura 1.23*. Ca rezultat, se produce separarea sarcinilor din conductor şi în interiorul lui apare un câmp electric de intensitate $\vec{E}$, determinat de sarcinile acumulate la capete. Mişcarea purtătorilor de sarcină spre capetele conductorului are loc până când forţa ce acţionează asupra lor din partea câmpului electric $F_e = qE$ devine egală în modúl cu forţa Lorentz (*fig. 1.23*), adică $F_e = F_L$ sau $qE = qvB$, de unde rezultă

$$E = vB. \qquad (1.17)$$

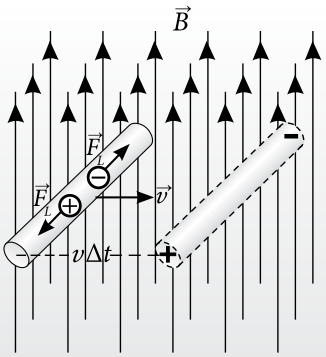



*Fig. 1.23*

Diferența de potențial la capetele conductorului, egală cu *t.e.m.* de inducție, se determină din relația $U = \mathscr{E}_i = E \cdot l$. Folosind expresia (1.17), obținem

$$\mathscr{E}_i = vBl. \qquad (1.18)$$

Dacă însă conductorul perpendicular pe liniile de câmp magnetic se deplasează cu viteza $\vec{v}$ orientată sub un unghi α față de vectorul inducției magnetice $\vec{B}$, atunci valoarea *t.e.m.* de inducție se calculează cu ajutorul relației

$$\mathscr{E}_i = Blv \sin \alpha. \qquad (1.19)$$

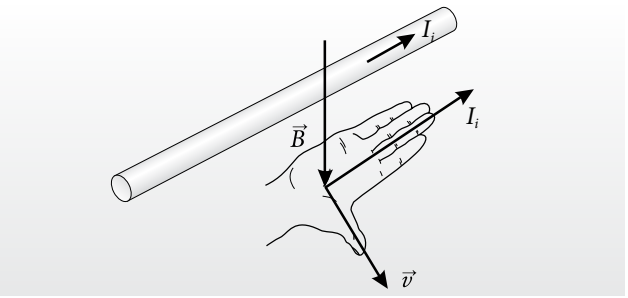



*Fig. 1.24*

Sensul curentului indus și al *t.e.m.* de inducție se stabilește cu ajutorul regulii lui Lenz, însă în cazul unui conductor rectiliniu este mai simplă și mai comodă utilizarea regulii mâinii drepte (*fig. 1.24*):

> Mâna dreaptă se așază astfel ca vectorul inducției magnetice $\vec{B}$ să intre în palmă, iar degetul mare întins lateral să indice sensul vectorului viteză $\vec{v}$ de deplasare a conductorului. În acest caz celelalte patru degete întinse vor indica sensul curentului indus $I_i$ în conductor.

## Problemă rezolvată

O bobină de forma unui cadru pătrat cu latura $a = 10$ cm este confecționată dintr-un conductor de lungime $l = 100$ m și rezistență $R = 10\ \Omega$, ale cărui capete sunt unite între ele. Bobina este așezată pe masă, astfel încât componenta verticală a câmpului magnetic terestru de inducție $B_\perp = 50\ \mu$T este perpendiculară pe planul ei. Ce sarcină va trece prin bobină la rotirea ei până la poziția în care liniile de câmp vor fi paralele cu planul bobinei?

**Se dă:**

$a = 0{,}1$ m,
$l = 100$ m,
$R = 10\ \Omega$,
$B_\perp = 5 \cdot 10^{-5}$ T

$\Delta q$ – ?

**Rezolvare:**

Din legea lui Ohm și (1.16) rezultă:

$$I_i = \frac{|\mathscr{E}_i|}{R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}.$$

În intervalul de timp $\Delta t$ prin circuitul bobinei trece sarcina $\Delta q = I_i\, \Delta t$, prin urmare:

$$\Delta q = \frac{|\Delta\Phi|}{R}. \qquad (1.20)$$

Observăm că sarcina $\Delta q$ depinde numai de variația fluxului magnetic, indiferent de rapiditatea acestui proces.

Fluxul magnetic prin fiecare spiră a bobinei este același, determinat de relația (1.14). Rezultă că fluxul total prin bobină are valoarea $\Phi_{tot.} = NB_\perp S \cos \alpha$, unde $N = l/(4a)$ este numărul de spire, iar $S = a^2$ este aria suprafeței secțiunii pătrate a bobinei. În poziția inițială, unghiul dintre perpendiculara pe suprafața $S$ și direcția liniilor de inducție este egal cu zero, iar fluxul magnetic

$$\Phi_{tot.1} = NB_\perp S \cos 0^\circ = \frac{l}{4a} B_\perp a^2 = \frac{1}{4} B_\perp la.$$

După rotirea bobinei, unghiul respectiv devine egal cu 90°, iar fluxul magnetic

$$\Phi_{tot.2} = NB_\perp S \cos 90^\circ = 0.$$

Introducând aceste rezultate în (1.20), obținem:

$$\Delta q = \frac{|\Phi_{tot.2} - \Phi_{tot.1}|}{R} = \frac{\Phi_{tot.1}}{R} = \frac{B_\perp la}{4R} = 1{,}25 \cdot 10^{-5}\ \text{C} = 12{,}5\ \mu\text{C}.$$

## Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă fenomenul inducției electromagnetice?
2. Care este construcția microfonului electrodinamic? Cum funcționează el?
3. Ce reprezintă cuptorul de inducție? Care este principiul de funcționare al acestuia?
4. Ce se numește flux magnetic și care este unitatea lui în SI?
5. Formulați regula lui Lenz. Care este modul de aplicare a acestei reguli?
6. Enunțați legea inducției electromagnetice. Care este expresia matematică a acesteia?
7. Determinați fluxul magnetic printr-o suprafață plană de arie $S = 100\ \text{cm}^2$, aflată într-un câmp magnetic de inducție $B = 0{,}6$ T, ce formează un unghi de $30^\circ$ cu suprafața.
8.* O spiră conductoare de arie $S = 50\ \text{cm}^2$, închisă printr-un condensator de capacitate $C = 200\ \mu\text{F}$, se află într-un câmp magnetic omogen, perpendicular pe planul spirei. Determinați sarcina de pe armăturile condensatorului, dacă viteza de variație a inducției magnetice este de $1\,000$ T/s.
9.* Un conductor de forma unui triunghi echilateral cu latura de $4$ cm și rezistența $R = 0{,}5\ \Omega$ este situat într-un câmp magnetic omogen de inducție $B = 0{,}05$ T. Liniile de inducție ale câmpului sunt perpendiculare pe planul conductorului. Ce sarcină va trece prin conductor la transformarea lui într-un cerc în același plan?

# 1.7. AUTOINDUCŢIA. INDUCTANŢA CIRCUITULUI

## a. Fenomenul de autoinducţie

Un caz particular foarte important al fenomenului inducţiei electromagnetice are loc la variaţia fluxului magnetic datorită curentului electric variabil din circuit. Într-adevăr, dacă prin spirele unei bobine circulă un curent variabil, atunci el produce în interiorul ei un câmp magnetic al cărui flux este, de asemenea, variabil. Astfel, în conformitate cu legea lui Faraday (1.16), în spirele bobinei ia naştere o *t.e.m.* proprie de inducţie, determinată de variaţia curentului prin aceeaşi bobină. Acest fenomen a fost descoperit de către fizicianul american Joseph Henry (1797–1878) şi se numeşte **autoinducţie**.

*Fig. 1.25*

***Autoinducţia* este fenomenul apariţiei *t.e.m.* de inducţie în circuite datorită curentului variabil din ele.**

În *figura 1.25* sunt reprezentate simbolurile bobinelor folosite în schemele circuitelor electrice: *a)* fără miez; *b)* cu miez de fier.

Fenomenul de autoinducţie se poate observa experimental cu ajutorul circuitului reprezentat în *figura 1.26*, alcătuit dintr-o sursă de curent continuu, la care sunt legate în paralel două ramuri. Una din ramuri conţine bobina $L$ şi becul $B_1$ legate în serie, iar a doua – un reostat $R$ şi becul $B_2$ identic cu $B_1$. Cu ajutorul reostatului se reglează rezistenţa ramurii până la egalarea ei cu cea a ramurii $LB_1$. Astfel, becurile $B_1$ şi $B_2$ se vor afla în aceleaşi condiţii de alimentare: prin ele vor circula curenţi egali şi vor lumina la fel.

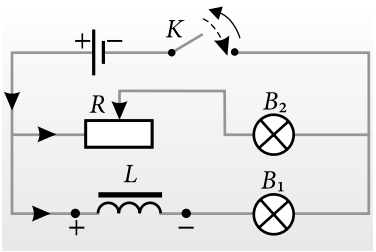



*Fig. 1.26*

La închiderea întrerupătorului $K$ se observă că becul $B_1$ obţine o strălucire normală cu o anumită întârziere faţă de cea a becului $B_2$. Cauza acestei întârzieri este fenomenul de autoinducţie. Într-adevăr, la închiderea întrerupătorului intensitatea curentului din circuit creşte rapid de la zero până la valoarea sa constantă $I$. În acelaşi timp, creşte şi inducţia câmpului magnetic creat de acest curent. Rezultă că bobina este străbătută de un **flux magnetic crescător** şi, conform legii inducţiei electromagnetice, în spirele ei se generează o tensiune electromotoare, numită în acest caz ***t.e.m.* de autoinducţie**.

Conform regulii lui Lenz, polaritatea *t.e.m.* de autoinducţie la bornele bobinei este inversă celei de alimentare (*fig. 1.26*). În concluzie, acţiunea acestei *t.e.m.* frânează mişcarea ordonată a electronilor prin conductorul din care este confecţionată bobina şi intensitatea curentului se micşorează. Astfel, prin ramura $LB_1$ circulă un curent mai mic decât prin ramura $RB_2$. Din această cauză strălucirea becului $B_1$ creşte mai lent decât a becului $B_2$. Însă îndată ce în circuit se stabileşte valoarea constantă a curentului de alimentare, cel de autoinducţie dispare şi becurile au aceeaşi strălucire.

Este evident că fenomenul de autoinducţie se va produce şi la deconectarea circuitului, când intensitatea curentului de alimentare se micşorează rapid de la valoarea constantă până la zero. În acest caz, bobina este străbătută de un **flux magnetic descrescător**. La bornele ei apare o *t.e.m.* de autoinducţie, cu aceeaşi polaritate ca şi sursa de alimentare a circuitului. În consecinţă, micşorarea curentului din circuit se produce mai

lent și din acest motiv becurile $B_1$ și $B_2$ nu se vor stinge imediat după deconectarea circuitului, ci cu o anumită întârziere. Existența curentului de autoinducție poate fi observată mai simplu cu ajutorul circuitului din *figura 1.27*. La deschiderea întrerupătorului *K*, sursa de curent este înlăturată din circuit, însă becul *B* continuă pentru un timp scurt să lumineze destul de puternic.

Fenomenul de autoinducție în circuitele electrice este asemănător cu cel de inerție a corpurilor în mecanică. Tot așa cum viteza unui corp nu poate fi mărită (micșorată) instantaneu până la o anumită valoare, nici intensitatea curentului la închiderea circuitului nu poate lua momentan valoarea maximă (nulă), ci variază treptat.

Inerția unui corp se manifestă diferit în funcție de masa lui: cu cât masa este mai mare, cu atât inerția corpului este mai pronunțată. La fel, și în cazul circuitelor electrice trebuie să existe o mărime fizică ce le caracterizează și, prin urmare, este o măsură a autoinducției. Această mărime a fost numită **inductanță**.

## b. Inductanța. *T.e.m.* de autoinducție

Fenomenul de autoinducție, fiind un caz particular al inducției electromagnetice, se manifestă cu atât mai intens cu cât este mai mare viteza de variație a fluxului magnetic propriu prin bobina circuitului cercetat. Fluxul magnetic ce străbate bobina este proporțional cu inducția câmpului magnetic din interiorul ei $\Phi \sim B$. În lipsa curentului în spirele bobinei ($I = 0$), câmpul magnetic nu există ($B = 0$).

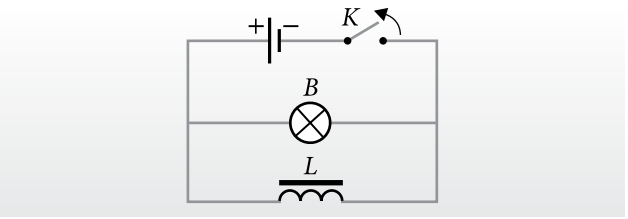



*Fig. 1.27*

Conchidem că inducția $B$ depinde de intensitatea curentului $I$. S-a stabilit că $B \sim I$. Drept rezultat,

$$\Phi = LI, \qquad (1.21)$$

unde $L$ este o constantă de proporționalitate specifică fiecărei bobine. Ea depinde de forma și dimensiunile bobinei, precum și de proprietățile magnetice ale miezului ei.

**Mărimea fizică egală cu raportul dintre fluxul magnetic ce străbate o bobină și intensitatea curentului prin ea se numește *inductanță* a acestei bobine:**

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Unitatea de inductanță în SI a fost numită **henry** (**H**). O bobină are inductanța $L = 1$ H dacă la parcurgerea ei de un curent cu intensitatea de 1 A fluxul magnetic prin suprafața limitată de bobină este de 1 Wb:

$$1\ \text{H} = 1\frac{\text{Wb}}{\text{A}}.$$

Dacă prin bobină circulă un curent $I$ variabil, atunci fluxul magnetic de asemenea este variabil și din legea inducției electromagnetice avem:

$$\mathscr{E}_a = -\frac{\Delta\,(LI)}{\Delta t} = -L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}. \qquad (1.22)$$

Tensiunea electromotoare (1.22) este numită ***t.e.m.* de autoinducție**, iar raportul $\Delta I/\Delta t$ reprezintă **viteza variației intensității curentului din circuit**. Așadar,

***t.e.m. de autoinducție* dintr-un circuit este direct proporțională cu viteza de variație a intensității curentului prin acest circuit, având coeficientul de proporționalitate egal cu inductanța bobinei din circuit.**

Din relația (1.22) se poate deduce încă o formulare a unității de inductanță. Un circuit sau un element al acestuia are inductanța de 1 H, dacă la variația uniformă a intensității curentului cu viteza de 1 A/s în acest circuit se generează o *t.e.m.* de autoinducție de 1 V, adică $1\,\text{H} = 1\,\text{V}\cdot\text{s/A}$.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce reprezintă fenomenul de autoinducție?
2. Cum se poate observa experimental fenomenul de autoinducție?
3. Ce se numește inductanță a unei bobine și care este unitatea ei în SI?
4. Cu ce este egală *t.e.m.* de autoinducție și de care factori depinde ea?
5. O bobină cu inductanța de 50 mH este parcursă de un curent continuu cu intensitatea de 2 A. Ce *t.e.m.* de autoinducție ia naștere la bornele bobinei, dacă la întreruperea circuitului din care face parte curentul se micșorează uniform până la 0 în timp de 1 ms?

## 1.8. ENERGIA CÂMPULUI MAGNETIC

Să analizăm fenomenul autoinducţiei din punctul de vedere al transformărilor energetice care au loc, de exemplu, în circuitul din *figura 1.27*. S-a constatat deja că, la întreruperea circuitului, becul *B* mai luminează destul de puternic un timp scurt. Evident, energia necesară pentru aceasta nu este preluată de la sursa de curent, doar ea este înlăturată din circuit. Becul însă a rămas legat la bornele bobinei. Rezultă că bobina se comportă ca o nouă sursă de energie, care nu este altceva decât energia câmpului magnetic. Într-adevăr, la închiderea circuitului, o parte din energia furnizată de către sursa de curent este consumată pentru crearea câmpului magnetic în bobină, fiind înmagazinată în interiorul ei. Această energie poate fi restituită în circuit numai la dispariţia câmpului magnetic, adică la întreruperea circuitului, când intensitatea curentului prin spirele bobinei scade până la zero.

Să calculăm energia câmpului magnetic dintr-o bobină caracterizată de inductanţa *L*. Pentru aceasta, vom observa că, după înlăturarea sursei de curent, lucrul mecanic necesar pentru deplasarea sarcinii electrice *q* prin circuitul închis, format din becul *B* şi bobina *L*, este efectuat pe seama energiei câmpului magnetic, care se micşorează până la zero. Întrucât lucrul mecanic efectuat în acest caz este egal cu produsul dintre *t.e.m.* de autoinducţie $\mathscr{E}_a$ şi sarcina transportată *q*, pentru energia câmpului magnetic al bobinei avem:

$$W_m = \mathscr{E}_a q. \qquad (1.23)$$

Pentru simplitate vom considera că intensitatea curentului se micşorează uniform, adică este o funcţie liniară în raport cu timpul. Atunci în intervalul de timp $\Delta t$, în decursul căruia intensitatea curentului se micşorează de la valoarea iniţială *I* până la cea finală egală cu zero, prin circuit este transportată sarcina

$$q = I_{med}\Delta t = \frac{I+0}{2}\,\Delta t = \frac{1}{2}\,I\Delta t, \qquad (1.24)$$

iar *t.e.m.* de autoinducţie, după cum rezultă din (1.22), are o valoare constantă

$$\mathscr{E}_a = -L\,\frac{0-I}{\Delta t} = \frac{LI}{\Delta t}. \qquad (1.25)$$

Introducând (1.24) şi (1.25) în (1.23) pentru energia câmpului magnetic al bobinei, obţinem

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \qquad (1.26)$$

Expresia (1.26) pentru energia câmpului magnetic este foarte asemănătoare cu cea pentru energia cinetică cunoscută din mecanică: $E_c = mv^2/2$. Din comparaţia lor, rezultă că inductanţa *L* a unui circuit electric este analogică cu masa *m* a unui corp în mişcare, iar intensitatea curentului de inducţie (viteza de variaţie a sarcinii electrice în circuit) – cu viteza *v* a acestui corp.

Ţinând seama de relaţia (1.21), energia câmpului magnetic al bobinei se mai poate exprima şi prin fluxul magnetic care o străbate:

$$W_m = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}. \qquad (1.27)$$

### Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se explică fenomenul autoinducţiei din punct de vedere energetic?
2. Cu ce este egală energia câmpului magnetic al unei bobine?
3. Determinaţi energia câmpului magnetic al unei bobine cu inductanţa de 80 mH, dacă prin ea circulă un curent continuu de 0,5 A.
4. Câmpul magnetic al unei bobine de inductanţă 8 mH posedă o energie de 1 mJ. Determinaţi: a) intensitatea curentului prin spirele bobinei; b) fluxul magnetic care străbate bobina.

Capitolul 2

# CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV

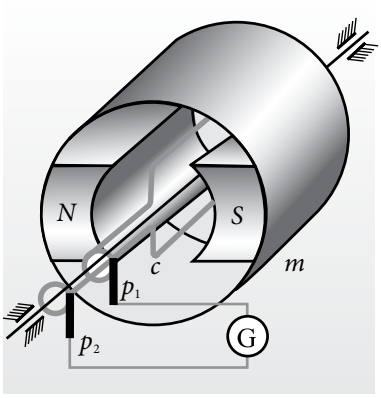



*Fig. 2.1*

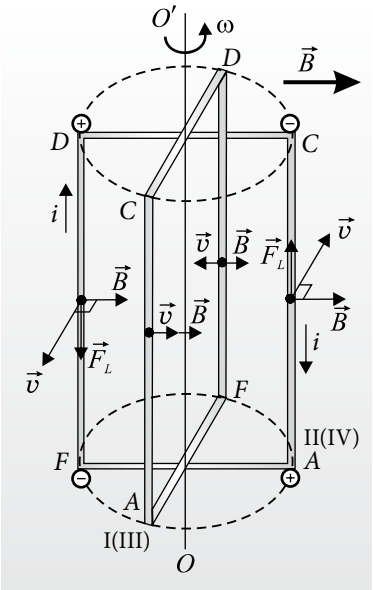



*Fig. 2.2*

## 2.1. GENERAREA TENSIUNII ELECTROMOTOARE ALTERNATIVE

### Să ne amintim

Cunoaștem că ecuația mișcării oscilatorii armonice (sinusoidale) este

$$x = A \sin (\omega t + \varphi_0). \qquad (2.1)$$

În această ecuație, mărimea $\omega t + \varphi_0$ este numită fază a oscilației. $\varphi_0$ este faza inițială, iar $\omega$ – pulsația oscilației. $A$ este amplitudinea oscilațiilor (abaterea maximă de la poziția de echilibru), iar $x$ – elongația (abaterea de la poziția de echilibru la momentul de timp $t$). Deoarece mișcarea oscilatorie este periodică, adică $x(t + T) = x(t)$, rezultă că $A \sin [\omega(t + T) + \varphi_0] = A \sin (\omega t + \varphi_0)$. Funcția „sinus" are perioada $2\pi$ și în intervalul de timp de la $t$ până la $t + T$ egal cu o perioadă faza oscilației se modifică cu $2\pi$. Adică $\omega(t + T) + \varphi_0 = \omega t + \varphi_0 + 2\pi$, de unde reiese relația dintre pulsația $\omega$ și perioada $T$:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \qquad (2.2)$$

unde $\nu$ este frecvența oscilațiilor – mărime egală numeric cu numărul de oscilații complete efectuate într-o unitate de timp.

În clasa a XI-a ați studiat legile curentului electric continuu, ale curentului care circulă doar într-un singur sens. Există însă curenți care, după intervale de timp strict determinate, își schimbă sensul în opus.

**Curent alternativ** se numește curentul care se modifică în timp după o lege armonică

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi_0). \qquad (2.3)$$

Aici $I_m$ constituie valoarea maximă sau amplitudinea intensității curentului, $i$ – valoarea lui instantanee, $\varphi_0$ – faza inițială a intensității curentului, mărimea ce se află sub semnul funcției „sinus" reprezintă ***faza*** intensității curentului, iar $\omega$ este pulsația lui.

Din comparația relațiilor (2.1) și (2.3) rezultă că intensitatea curentului alternativ are un caracter oscilatoriu.

**Intervalul de timp în care intensitatea curentului *i* efectuează o oscilaţie completă, adică obţine consecutiv aceeaşi valoare numerică, se numeşte *perioadă*, iar numărul oscilaţiilor complete efectuate într-o secundă – *frecvenţă* a curentului alternativ.**

Pulsaţia curentului alternativ se exprimă prin ***frecvenţa*** ν şi ***perioada*** $T$ ale acestuia cu ajutorul relaţiei (2.2).

Frecvenţa curentului alternativ în SI se exprimă în **hertzi** (**Hz**). Valoarea standard a acesteia, numită **frecvenţă industrială**, în majoritatea ţărilor este de 50 Hz (în SUA şi Canada, de exemplu, frecvenţa industrială este de 60 Hz).

Cea mai simplă metodă de obţinere a curentului electric alternativ constă în crearea unui flux magnetic variabil în timp, care străbate suprafaţa unui cadru metalic *(fig. 2.1*). O astfel de variaţie se poate realiza în două moduri: fie prin rotirea cadrului metalic *c* în câmp magnetic staţionar, fie prin rotirea câmpului magnetic, adică a cilindrului *m* pe pereţii căruia sunt prinşi magneţii cu polii N şi S, în jurul cadrului metalic fix. Conform legii inducţiei electromagnetice, în ambele cazuri, în cadrul metalic se generează un curent de inducţie cu atât mai mare, cu cât viteza de variaţie a fluxului magnetic este mai mare. Dacă capetele cadrului se vor suda la două inele, atunci periuţele alunecătoare $p_1$ şi $p_2$ vor colecta tensiunea electromotoare (*t.e.m.*) indusă, măsurată de galvanometrul *G*. În cele ce urmează vom nota toate mărimile electrice variabile cu litere mici (*i, u, e*), iar valorile maxime ale lor, respectiv, cu litere mari ($I_m$, $U_m$, $\mathscr{E}_m$).

Să analizăm mai amănunţit procesul de generare a tensiunii electromotoare alternative. În acest scop, cercetăm mişcarea de rotaţie cu viteza unghiulară ω a cadrului *ACDF* într-un câmp magnetic staţionar de inducţie $\vec{B}$ (*fig. 2.2*). Observăm că laturile *AC* şi *DF* de lungime *l* se deplasează cu viteza liniară $\vec{v}$, descriind un cilindru de rază egală cu jumătate din lungimea laturilor *AF* şi *CD* ale cadrului. Electronii liberi din laturile *AC* şi *DF*, mişcându-se cu aceeaşi viteză $\vec{v}$ în câmpul magnetic de inducţie $\vec{B}$, vor fi acţionaţi de forţa Lorentz din partea acestui câmp şi de aceea devine posibilă separarea sarcinilor electrice pozitive şi negative, adică apariţia unei diferenţe de potenţial. Întrucât mişcarea de rotaţie este periodică, vom examina acest proces în decursul unei perioade, adică al unei rotaţii complete.

La momentul de timp $t = 0$, când liniile câmpului magnetic sunt perpendiculare pe planul cadrului (poziţia I în *fig. 2.2*), vectorii $\vec{v}$ şi $\vec{B}$ sunt coliniari şi forţa Lorentz $F_L = |e|\upsilon B \sin\alpha$ este nulă. Datorită mişcării de rotaţie a cadrului, unghiul $\alpha = \omega t$ dintre $\vec{v}$ şi $\vec{B}$ creşte. Iar odată cu el se măreşte şi forţa Lorentz, ce acţionează asupra electronilor liberi, devenind maximă la momentul $t = \pi/2\omega$, pentru care $\alpha = \pi/2$. Sensul acestei forţe se stabileşte cu ajutorul regulii mâinii stângi. Astfel, la capetele *C* şi *F* (poziţia II în *fig. 2.2*) se acumulează sarcina negativă, iar la *A* şi *D* – pozitivă. Din această cauză prin laturile *AC* şi *DF* circulă un curent de intensitate *i*, având sensul prin fiecare din ele indicat în *figura 2.2*. La creşterea unghiului α în intervalul $\pi/2 < \alpha < \pi$, forţa Lorentz, ce acţionează asupra electronilor liberi din cadru, se micşorează. La momentul de timp $t = \pi/\omega$, când $\alpha = \pi$ (poziţia III în *fig. 2.2*), la capetele laturilor *AC* şi, respectiv, *DF* diferenţa de potenţial devine nulă, de aceea prin cadru nu circulă curent. Rotirea în continuare a cadrului ($\pi < \alpha < 2\pi$) conduce la apariţia în laturile *AC* şi *DF* a unui curent de sens opus celui care circula în ele când $0 < \alpha < \pi$. Acest curent are valoarea maximă în modúl la momentul de timp $t = 3\pi/2\omega$ (poziţia IV în *fig. 2.2*), când laturile *AC* şi *DF* îşi schimbă reciproc poziţiile.

Conform relaţiei (1.19), *t.e.m.* induse în laturile *AC* şi *DF* la un moment de timp arbitrar sunt $e_{AC} = Bvl\sin\alpha$ şi $e_{DF} = Bvl\sin(\pi - \alpha) = Bvl\sin\alpha$, care se adună asemenea *t.e.m.* a generatoarelor grupate în serie. Astfel, în cadrul metalic se induce o *t.e.m.*

$$e = e_{AC} + e_{DF} = 2Bvl\sin\alpha = \mathscr{E}_m \sin\omega t, \qquad (2.4)$$

unde $\mathscr{E}_m = 2Bvl$ este valoarea maximă a *t.e.m.* indusă în cadru.

Luând în considerare relaţia dintre viteza liniară $\upsilon$ şi cea unghiulară ω (cunoscută din clasa a X-a), $\upsilon = 2\pi\nu r = \omega r = \omega d/2$ (*d* este lungimea laturilor *AF* şi *CD* perpendiculare pe axa de rotaţie), pentru valoarea maximă a *t.e.m.* din cadru avem:

$$\mathscr{E}_m = 2Bl \cdot \omega\frac{d}{2} = \omega BS = \omega\Phi_m, \qquad (2.5)$$

unde $S = ld$ este aria suprafeţei cadrului, iar $\Phi_m$ este valoarea maximă a fluxului magnetic prin această

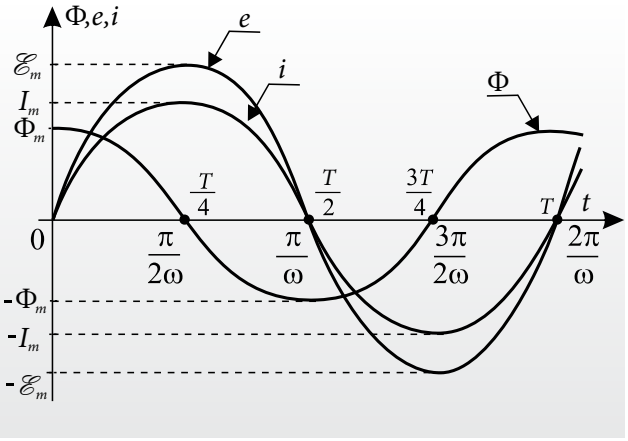



*Fig. 2.3*

suprafaţă. Vom menţiona că valoarea *t.e.m.* maxime $\mathscr{E}_m$ poate fi amplificată nu numai pe seama mărimilor ce intervin în (2.5), ci şi confecţionând un cadru cu mai multe spire. Dacă cadrul metalic conţine $N$ spire, atunci

$$\mathscr{E}_m = N\omega BS = N\omega\Phi_m.$$

**Mişcarea uniformă de rotaţie a unui cadru metalic în jurul axei de simetrie perpendiculară pe liniile unui câmp magnetic omogen generează *t.e.m.* alternativă sinusoidală.**

*T.e.m.* (2.4) indusă în cadru determină apariţia unui curent sinusoidal indus, care poate fi pus în evidenţă cu un galvanometru $G$ (*fig. 2.1*). Conform legii lui Ohm, intensitatea acestui curent $i = e/R_t$, unde $R_t$ reprezintă rezistenţa totală a circuitului format. Obţinem:

$$i = I_m \sin\omega t, \qquad (2.6)$$

unde

$$I_m = \mathscr{E}_m / R_t.$$

În *figura 2.3* sunt prezentate graficele: *t.e.m. e* (2.4), al intensităţii curentului *i* (2.6) şi al fluxului magnetic Φ (1.14) în funcţie de timp. Se constată că *t.e.m. e* şi intensitatea curentului *i* obţin valori-limită ($\pm\mathscr{E}_m$ şi $\pm I_m$) pe când fluxul magnetic prin cadrul metalic este nul. Aceasta se realizează la momentele de timp $t = (2k + 1)\pi/2\omega = (2k + 1)T/4$ ($k \in N$), când viteza de variaţie a fluxului magnetic este maximă. Altfel spus, atunci când laturile *AC* şi *DF*, numite **active**, „taie" cele mai multe linii de câmp în unitatea de timp. Se mai observă că în decursul unei perioade semnul *t.e.m. e* şi al curentului *i* alternează de două ori: sunt pozitive în intervalul $0 < t < T/2$ la descreşterea fluxului magnetic prin spiră şi negative – în intervalul $T/2 < t < T$ la creşterea lui. Din acest motiv, modul de obţinere a curentului electric alternativ descris mai sus este numit **principiul alternatorului**.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Ce reprezintă perioada şi frecvenţa curentului alternativ sinusoidal?
2. Ce lege stă la baza obţinerii curentului electric alternativ? Cum poate fi colectată *t.e.m.* alternativă?
3. Descrieţi procesul de separare a sarcinilor pozitive şi negative. Care este sensul curentului indus?
4. Cum poate fi amplificată *t.e.m.* maximă, obţinută prin rotirea unui cadru metalic în câmp magnetic?
5. Explicaţi de ce *t.e.m. e* şi curentul *i* capătă valori-limită când fluxul magnetic ce străbate cadrul metalic este nul?
6. Frecvenţa industrială a curentului alternativ este egală cu 50 Hz. De câte ori îşi schimbă sensul acest curent în decurs de o secundă?

## 2.2. VALORILE EFECTIVE ALE INTENSITĂŢII ŞI TENSIUNII ALTERNATIVE

Într-un circuit de curent alternativ sinusoidal valorile medii ale *t.e.m.* şi intensităţii curentului în decurs de o perioadă sunt nule. Dacă însă în acest circuit se conectează un aparat de măsură a acestor mărimi pentru curentul alternativ, atunci el înregistrează anumite valori. Ce reprezintă, în acest caz, indicaţia aparatului de măsură şi care este sensul ei fizic?

Studiul experimental al acţiunii termice a curentului electric demonstrează că într-un conductor de rezistenţă $R$ cantitatea de căldură disipată prin efect Joule nu depinde de sensul curentului. Deci există o astfel de valoare a intensităţii curentului continuu, încât în acelaşi interval de timp valoarea medie a cantităţii de căldură $\overline{Q_a} = \overline{i^2}R \cdot \Delta t$ degajată în cazul curentului alternativ este egală cu cantitatea de căldură $Q_c = I^2 R \cdot \Delta t$ în cazul curentului continuu. Luând în considerare (2.6), pentru căldura disipată în conductor în intervalul de timp $\Delta t << T$ avem:

$$Q_a = I_m^2 R \Delta t \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$

Valoarea medie a acestei mărimi se poate calcula matematic, dar este mai simplu să folosim în acest scop metoda grafică. În *figura 2.4* este reprezentată dependența căldurii disipate într-o unitate de timp $Q_a/\Delta t$ în conductorul de rezistență $R$ în funcție de timpul $t$. Se observă că în intervalul de timp $\Delta t = T$ aria figurii mărginită de graficul $Q_a(t)$ este egală cu aria dreptunghiului $OMNT$ (părțile colorate situate mai sus de linia medie $I_m^2 R/2$ le completează pe cele necolorate dintre abscisă și această linie). Așadar, în decursul unei perioade, în conductorul parcurs de curent alternativ se degajă căldura $\overline{Q_a} = \frac{1}{2} I_m^2 RT$, iar în același conductor parcurs de curent continuu – căldura $Q_c = I^2 RT$. Din egalitatea acestor relații obținem:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \qquad (2.7)$$

Mărimea $I$ definită de relația (2.7) se numește **intensitate efectivă** a curentului alternativ și este de $\sqrt{2}$ ori mai mică decât valoarea sa maximă.

**Valoarea efectivă a intensității curentului alternativ *i* este egală cu intensitatea *I* a unui curent continuu, care în același interval de timp, de o perioadă, produce într-un conductor un efect termic echivalent cu cel produs de curentul alternativ.**

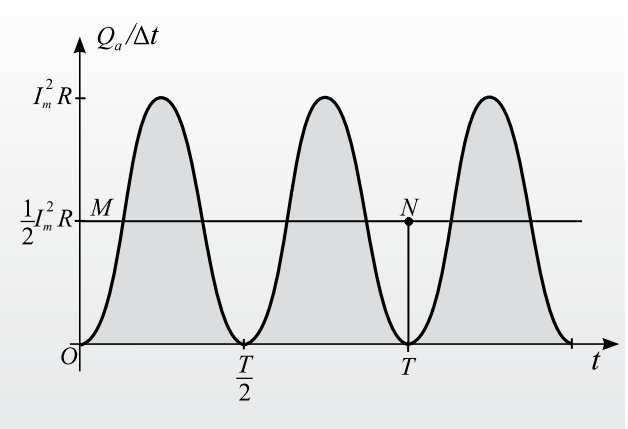



*Fig. 2.4*

Deoarece $U = IR$, rezultă că tensiunea curentului alternativ $u$ de asemenea este caracterizată de o valoare efectivă, și anume:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (2.8)$$

Menționăm că aparatele de măsură folosite în circuitele de curent alternativ întotdeauna indică valorile efective ale mărimilor electrice măsurate.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se definește valoarea efectivă a intensității curentului alternativ?
2. Cum se exprimă valorile efective ale intensității și tensiunii alternative prin valorile maxime respective?
3. Determinați valoarea maximă a tensiunii din rețeaua de curent alternativ, dacă voltmetrul indică valoarea de 220 V.
4. La trecerea curentului alternativ de frecvență $\nu = 50$ Hz printr-un conductor cu rezistența de 400 Ω, în fiecare perioadă se degajă o cantitate de căldură de 16 J. Care este valoarea maximă și cea efectivă a intensității curentului?

## 2.3.* CIRCUITE ÎN CURENT ALTERNATIV

Elementele de bază ale oricărui circuit electric sunt rezistorul, condensatorul și bobina, caracterizate, respectiv, de rezistența $R$, capacitatea $C$ și inductanța $L$. În realitate, fiecare dintre aceste elemente întotdeauna este caracterizat de combinația acestor mărimi, însă de multe ori ele pot fi considerate ideale. În acest caz, fiecare element este definit exclusiv printr-o singură mărime $R$, $L$ sau $C$. Pentru simplitate, în cele ce urmează, vom considera circuitele în curent alternativ compuse din elemente ideale.

### a. Particularitățile circuitelor în curent alternativ

Spre deosebire de circuitele de curent continuu, în cele de curent alternativ se evidențiază anumite particularități importante specifice acestora. Vom menționa, în primul rând, că circuitele în curent alternativ reprezintă sisteme oscilatorii. Tensiunea sinusoidală

$$u = U_m \sin \omega t, \qquad (2.9)$$

aplicată la bornele circuitului, constituie sursa de energie care întreține oscilațiile de pulsație ω ale intensității curentului și tensiunii din circuit.

Cu toate că legea lui Ohm a fost stabilită pentru curentul continuu, ea este valabilă și pentru valorile instantanee ale tensiunii și intensității curentului alternativ. Pentru aceasta este necesar ca intensitatea curentului să rămână aproximativ aceeași în orice secțiune a conductorului. Curentul electric de frecvență industrială ($\nu = 50$ Hz) îndeplinește condiția dată cu un grad de precizie foarte înalt și de aceea se spune că este **cvasistaționar**.

Comportamentul condensatoarelor și al bobinelor în curent alternativ este calitativ diferit de cel în curent continuu. Dacă într-un circuit de curent continuu condensatorul are un rol simplu de întrerupere a circuitului, atunci în curent alternativ el suportă un proces de încărcare-descărcare cu atât mai intens, cu cât este mai mare frecvența $\nu$. Din această cauză în circuit se stabilește un curent alternativ de aceeași frecvență. În curent continuu bobina se comportă ca un rezistor, în care se degajă prin efect Joule o cantitate de căldură proporțională cu rezistența ei, iar în curent alternativ ea determină apariția unei *t.e.m.* de autoinducție, care modifică intensitatea curentului din acest circuit.

Întrucât procesele și legile care au loc în circuitele de curent alternativ sunt mai complicate decât cele din curent continuu, vom începe cu analiza celor mai simple circuite, compuse din elemente individuale considerate ideale. Menționăm că în cazul circuitelor mai complicate este foarte comodă reprezentarea mărimilor fizice oscilatorii ale circuitului prin ***fazori*** în cadrul unor diagrame.

**Să ne amintim**

La studiul oscilațiilor mecanice (în clasa a X-a) s-a definit noțiunea de ***fazor***. Acesta este un vector rotitor atribuit oscilației descrise de ecuația (2.1) și caracterizat de următoarele proprietăți: are modulul egal cu amplitudinea oscilației reprezentate $A$; este orientat astfel încât unghiul format cu o direcție aleasă arbitrar (de exemplu, axa $Ox$), la momentul inițial de timp $t = 0$, este egal cu faza inițială a oscilației $\varphi_0$ (*fig. 2.5*). Deoarece unghiul dintre fazor și axa $Ox$ crește liniar în timp, fazorul se rotește în planul $xOy$ în sens trigonometric, având viteza unghiulară egală cu pulsația $\omega$ a oscilației reprezentate.

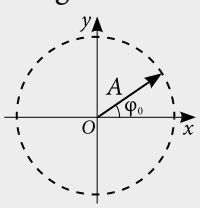


*Fig. 2.5*

## b. Rezistor ideal în curent alternativ

Cel mai simplu circuit electric se obține la aplicarea unei tensiuni la bornele rezistorului de rezistență $R$ (*fig. 2.6, a*). Dacă tensiunea aplicată este continuă, atunci în circuit se stabilește un curent staționar determinat de legea lui Ohm:

$$I = \frac{U}{R}, \qquad (2.10)$$

iar în rezistor se degajă o anumită cantitate de căldură.

Dacă însă se aplică tensiunea alternativă de forma (2.9), atunci prin rezistor circulă un curent alternativ (cvasistaționar), valoarea instantanee a căruia se determină tot din legea lui Ohm:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R}\sin\omega t = I_m \sin\omega t,$$

unde $I_m = U_m / R$. Folosind relațiile (2.7) și (2.8) pentru valorile efective, avem:

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (2.11)$$

Relația (2.11) coincide după formă cu legea lui Ohm (2.10), însă tensiunea și intensitatea reprezintă valorile efective ale mărimilor alternative respective.

În *figura 2.6, b* sunt prezentate graficele tensiunii și intensității curentului alternativ în funcție de faza $\omega t$. Se observă că aceste mărimi oscilează în aceeași fază, adică defazajul lor este nul. Atât intensitatea curentului, cât și tensiunea ating valorile lor maxime la aceleași momente.

Diagrama fazorială în acest caz este foarte simplă (*fig. 2.6, c*). Se alege o direcție arbitrară (linia întreruptă), de-a lungul căreia se depune vectorul intensității curentului de modúl egal cu valoarea maximă $I_m$. Întrucât tensiunea $u$ și intensitatea curentului $i$ oscilează în fază (*fig. 2.6, b*), vectorul tensiunii de modúl egal cu valoarea maximă $U_{m,R}$ trebuie orientat de-a lungul aceleiași direcții.

## c. Bobină ideală în curent alternativ

Considerăm o bobină ideală de inductanță $L$, conectată la sursa de tensiune alternativă $u$ de forma (2.9). Circuitul format (*fig. 2.7, a*) este parcurs de un curent $i$ de asemenea alternativ, descris de relația (2.6). La trecerea acestui curent prin bobină se produce fenomenul de autoinducție. Astfel, de rând cu tensiunea de alimentare $u$, în circuit mai acționează și *t.e.m.* de autoinducție (1.22), adică:

$$e_a = -L\frac{di}{dt}.$$

Aici $\frac{di}{dt}$ este derivata intensităţii curentului $i$ în raport cu timpul $t$. Menţionăm că notaţia $y'$ folosită la matematică este echivalentă cu $\frac{dy}{dx}$ şi semnifică derivata funcţiei $y$ în raport cu coordonata $x$.

După derivarea expresiei (2.6) în raport cu timpul şi folosind relaţia matematică $\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, avem:

$$e_a = -I_m \omega L \cos \omega t = -I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (2.12)$$

Din relaţiile (2.9) şi (2.12) rezultă:

**în circuitul de curent alternativ bobina se comportă ca un generator de tensiune, faza căreia este în avans cu $\pi/2$ faţă de cea de alimentare.**

Prin analogie cu (2.10), legea lui Ohm pentru circuitul cercetat poate fi scrisă sub forma:

$$i = \frac{u + e_a}{R} \quad \text{sau} \quad u + e_a = iR.$$

Deoarece rezistenţa bobinei se neglijează (ea este considerată ideală), rezultă că

$$u + e_a = 0. \qquad (2.13)$$

Introducând (2.12) în (2.13), obţinem tensiunea instantanee din circuit şi, totodată, de la bornele bobinei:

$$u = u_L = -e_a = I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \qquad (2.14)$$

unde

$$U_m = I_m \omega L$$

şi semnifică valoarea maximă sau de amplitudine a tensiunii la bornele bobinei, care poate fi prezentată prin valorile efective sub forma:

$$\frac{U}{I} = \omega L. \qquad (2.15)$$

Din comparaţia relaţiei (2.15) cu legea lui Ohm pentru curentul continuu (2.10), rezultă că produsul dintre inductanţă şi pulsaţie are semnificaţia unei rezistenţe. Într-adevăr, în SI avem:

$$[\omega L] = \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{H} = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{s} \cdot \mathrm{A}} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \Omega.$$

**Bobina introduce în circuitul de curent alternativ o rezistenţă aparentă $X_L$, numită *reactanţă inductivă*:**

$$X_L = \omega L. \qquad (2.16)$$

Din (2.15) şi (2.16) rezultă

$$I = \frac{U}{X_L}. \qquad (2.17)$$

Aceasta este legea lui Ohm pentru circuitul compus dintr-o bobină ideală în curent alternativ.

Din relaţiile (2.14), (2.6) şi din reprezentarea lor grafică (*fig. 2.7, b*) se observă că faza tensiunii $\varphi_u$ o avansează pe cea a intensităţii $\varphi_i$ cu $\pi/2$. Deci

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \omega t + \frac{\pi}{2} - \omega t = \frac{\pi}{2}.$$

**În circuitul de curent alternativ bobina creează un defazaj al tensiunii în avans cu $\pi/2$ faţă de intensitate.**

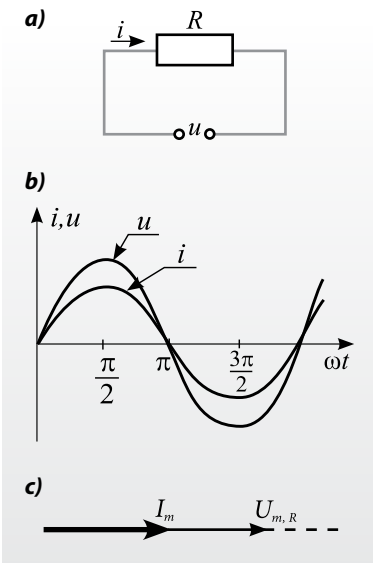



*Fig. 2.6*

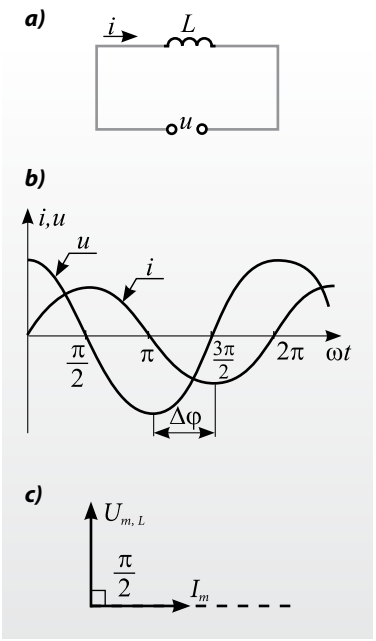



*Fig. 2.7*

În *figura 2.7, c* este reprezentată diagrama fazorială a acestui circuit. Pe direcţia aleasă arbitrar (linia întreruptă) este depus fazorul intensităţii curentului $I_m$, iar fazorul tensiunii $U_{m,L}$ este orientat sub un unghi de 90°, luat în sens trigonometric faţă de intensitatea curentului.

### d. Condensator ideal în curent alternativ

Să analizăm circuitul reprezentat în *figura 2.8, a*. S-a menţionat deja că unicul efect al tensiunii continue aplicate la bornele condensatorului este încărcarea acestuia până la o diferenţă de potenţial egală cu tensiunea sursei. Evident, în decursul încărcării (descărcării) condensatorului, în circuit există un curent de foarte scurtă durată care însă dispare odată cu terminarea procesului de încărcare (descărcare). Rezultă că, pentru menţinerea unui anumit curent în circuitul studiat, trebuie să asigurăm un proces continuu de încărcare-descărcare a condensatorului, adică de variaţie a sarcinii de pe armăturile lui. Cu cât acest proces se desfăşoară mai rapid, cu atât intensitatea curentului din circuit este mai mare.

Fie $q$ sarcina de pe armăturile condensatorului la un moment oarecare al procesului de încărcare (descărcare) a lui. Luând în considerare că sarcina ce se acumulează pe armăturile condensatorului este egală cu produsul dintre tensiunea de încărcare şi capacitatea lui ($q = uC$), pentru intensitatea curentului obţinem:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(uC)}{dt} = C\frac{du}{dt}. \qquad (2.18)$$

**Intensitatea curentului care parcurge circuitul format dintr-un condensator ideal este egală cu produsul dintre capacitatea lui şi viteza de variaţie a tensiunii alternative aplicate.**

Din (2.18) reiese că în cazul tensiunii constante la bornele condensatorului derivata este nulă, iar odată cu ea şi intensitatea curentului $i = 0$, adică **condensatorul întrerupe circuitul de curent continuu**. Dacă însă circuitul este alimentat cu o tensiune variabilă în timp, de exemplu alternativă, de forma (2.9), atunci, după cum rezultă din (2.18), intensitatea curentului din circuit este:

$$i = U_m\omega C\cos\omega t = U_m\omega C\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \qquad (2.19)$$

unde

$$I_m = U_m\omega C$$

şi prezintă valoarea maximă sau de amplitudine a intensităţii curentului alternativ din circuit. Exprimând valorile maxime prin cele efective, relaţia precedentă se poate prezenta sub forma:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C}, \qquad (2.20)$$

din care rezultă că mărimea inversă produsului dintre pulsaţia tensiunii alternative şi capacitatea condensatorului are semnificaţia unei rezistenţe. Într-adevăr, în SI avem:

$$\left[\frac{1}{\omega C}\right] = \frac{1}{\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{F}} = \frac{\mathrm{s}\cdot\mathrm{V}}{\mathrm{C}} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = \Omega.$$

**Condensatorul introduce în circuitul de curent alternativ o rezistenţă aparentă $X_C$, numită *reactanţă capacitivă*:**

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \qquad (2.21)$$

Legea lui Ohm pentru circuitul de curent alternativ care conţine numai un condensator ideal are acelaşi aspect ca şi în cazul curentului continuu (2.10), dar cu altă semnificaţie a mărimilor respective:

$$I = \frac{U}{X_C}. \qquad (2.22)$$

Din relaţiile (2.9), (2.19) şi *figura 2.8, b*, unde acestea sunt reprezentate grafic, se observă că tensiunea şi intensitatea curentului din circuitul cu condensator de asemenea sunt defazate una faţă de alta, şi anume:

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \omega t - \omega t - \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}.$$

**În circuitul de curent alternativ condensatorul creează un defazaj al tensiunii în devans cu $\pi/2$ faţă de intensitatea curentului.**

Astfel, dacă în circuitul din *figura 2.8, a* circulă un curent $i = I_m \sin \omega t$, atunci tensiunea la bornele lui şi, totodată, la bornele condensatorului, fiind defazată cu $\pi/2$ în urmă faţă de intensitate, va avea aspectul

$$u = u_C = U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{I_m}{\omega C}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Diagrama fazorială, reprezentată în *figura 2.8, c* pentru circuitul cu condensator ideal, se deosebeşte de cea cu bobină ideală numai prin sensul fazorului tensiunii $U_{m,C}$. În acest caz el se construieşte tot sub un unghi de 90° faţă de fazorul intensităţii curentului $I_m$, dar în sens opus celui trigonometric.

## e. Circuite *RLC* serie în curent alternativ. Legea lui Ohm

Elementele de circuit, analizate anterior, în mod individual pot forma diferite combinaţii prin legarea lor în serie, în paralel sau mixt. Considerăm circuitul serie în curent alternativ reprezentat în *figura 2.9*, care este format din rezistorul de rezistenţă $R$, bobina de inductanţă $L$ şi condensatorul de capacitate $C$. Dacă la bornele acestui circuit se aplică o tensiune alternativă de pulsaţie ω, atunci prin elementele circuitului se stabileşte un curent alternativ de aceeaşi pulsaţie $i = I_m \sin \omega t$.

Pe fiecare element al circuitului se produce o cădere de tensiune proporţională cu rezistenţa sau reactanţa lor. În circuitul serie, suma acestora trebuie să fie egală cu tensiunea de la bornele lui. Astfel, la orice moment de timp, pentru valorile instantanee ale tensiunilor are loc relaţia

$$u_R + u_L + u_C = u, \tag{2.23}$$

unde $u_R$, $u_L$ şi $u_C$ sunt tensiunile pe elemente respective de circuit, care, după cum reiese din temele precedente, au valorile:

$$\begin{aligned} u_R &= I_m R \sin \omega t, \\ u_L &= I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \\ u_C &= \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned} \tag{2.24}$$

reprezentate grafic, respectiv, în *figurile 2.6, b, 2.7, b* şi *2.8, b*. Deoarece fazele acestor tensiuni sunt diferite, între tensiunea de la bornele circuitului şi intensitatea curentului stabilit prin el va exista un defazaj φ, care poate lua valori atât pozitive şi negative, cât şi zero. Dacă faza intensităţii curentului se ia ca referinţă, atunci tensiunea este caracterizată de faza $\omega t + \varphi$, adică

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi). \tag{2.25}$$

Folosind definiţiile reactanţelor inductivă şi capacitivă, după introducerea relaţiilor (2.24) şi (2.25) în (2.23) obţinem:

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = RI_m \sin \omega t + X_L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + X_C I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{2.26}$$

sau

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_{m,R} \sin \omega t + U_{m,L} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + U_{m,C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \tag{2.27}$$

unde

$$U_{m,R} = RI_m,\ U_{m,L} = X_L I_m = \omega L I_m,\ U_{m,C} = X_C I_m = I_m / \omega C \tag{2.28}$$

sunt, respectiv, tensiunile maxime pe rezistor, bobină şi condensator.

Pentru adunarea termenilor din partea dreaptă a ecuaţiei (2.26) sau (2.27) se poate folosi metoda analitică, însă mult mai simplă este metoda diagramelor fazoriale.

De-a lungul direcţiei de referinţă, aleasă arbitrar (linia întreruptă), se depune fazorul intensităţii curentului $I_m$ şi cel al tensiunii pe rezistor $U_{m,R}$. Fazorii $U_{m,L}$ şi $U_{m,C}$ se depun din aceeaşi origine pe direcţia luată sub un unghi de π/2 faţă de cea de referinţă în sens trigonometric şi, respectiv,

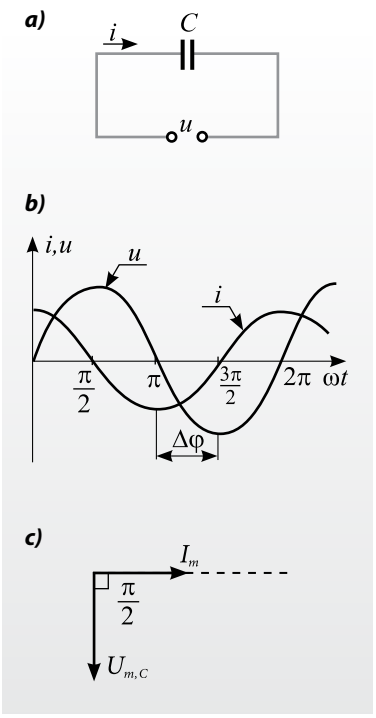



*Fig. 2.8*

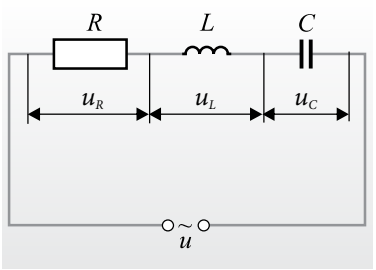



*Fig. 2.9*

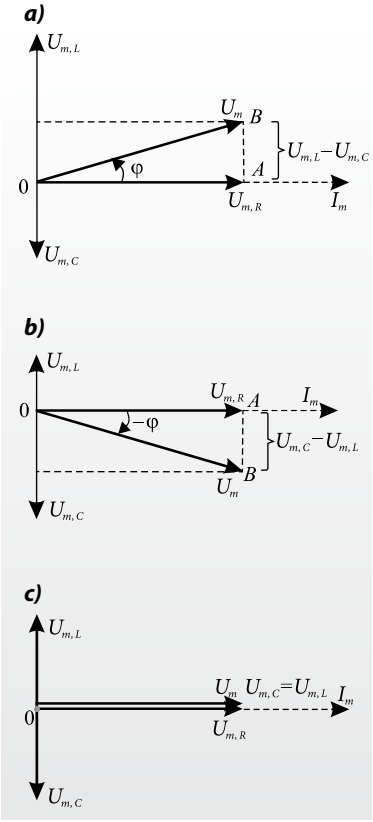



*Fig. 2.10*

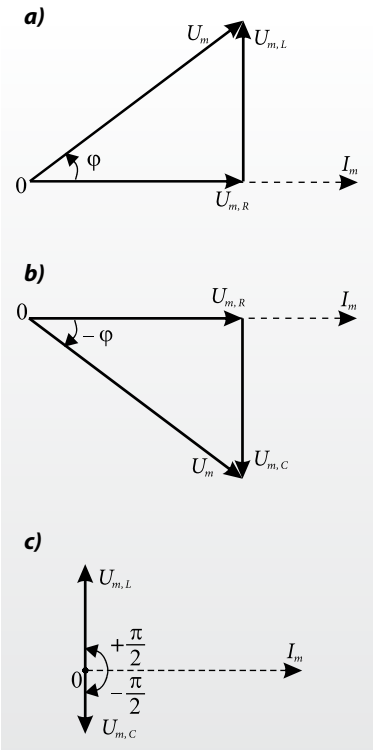



*Fig. 2.11*

în sens opus (*fig. 2.10*). Întrucât fazorii $U_{m,L}$ și $U_{m,C}$ au faze opuse, modulele lor reprezintă doi termeni concurenți, care determină aspectul diagramei fazoriale. Sunt posibile trei situații:

1) $U_{m,L} > U_{m,C}$, adică $\omega L > 1/\omega C$. În acest caz se spune că circuitul este ***preponderent inductiv***. Pe diagrama fazorială, din *figura 2.10, a*, se observă că tensiunea $U_m$, care reprezintă fazorul rezultant, este în avans de fază cu unghiul φ față de intensitatea curentului $I_m$, adică $\varphi > 0$.

2) $U_{m,C} > U_{m,L}$, adică $1/\omega C > \omega L$ – circuitul este ***preponderent capacitiv***. Diagrama fazorială este reprezentată în *figura 2.10, b*. În acest caz, tensiunea $U_m$ este în devans de fază cu unghiul φ față de intensitatea curentului $I$, adică $\varphi < 0$.

Din $\Delta AOB$ al diagramelor fazoriale reprezentate în *figura 2.10*, numit și triunghiul tensiunilor, rezultă:

$$U_m = \sqrt{U_{m,R}^2 + \left(U_{m,L} - U_{m,C}\right)^2}.$$

Folosind relațiile (2.28) și trecând la valorile efective ale intensității curentului $I$ (2.7) și tensiunii $U$ (2.8), avem:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \text{ sau } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}}. \qquad (2.29)$$

Relațiile (2.29) reprezintă legea lui Ohm pentru circuitul de curent alternativ *RLC* serie. Expresia din numitorul acestor relații constituie rezistența totală a circuitului în curent alternativ și este numită **impedanță**. Notând impedanța cu

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \text{ sau } Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}, \qquad (2.30)$$

legea lui Ohm astfel capătă un aspect simplu:

$$I = \frac{U}{Z}. \qquad (2.31)$$

Defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului din circuit se determină ușor din același triunghi al tensiunilor (*fig. 2.10*):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_{m,L} - U_{m,C}}{U_{m,R}}$$

sau, înlocuind tensiunile din (2.28), obținem:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}. \qquad (2.32)$$

3) $U_L = U_C$, adică $\omega L = 1/\omega C$. În această situație efectele inductiv și capacitiv se compensează reciproc, iar defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului $\varphi = 0$ (*fig. 2.10, c*).

Prin eliminarea sau adăugarea (vezi problema rezolvată nr. 3, p. 34) de elemente în circuitul din *figura 2.9* se obțin și alte circuite serie. Astfel, din (2.29) și (2.32) obținem următoarele cazuri particulare:

pentru circuitul *RL* ($X_C = 0$):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L}{R}, \qquad (2.33)$$

pentru circuitul $RC$ ($X_L = 0$):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}, \quad \text{tg}\varphi = -\frac{X_C}{R}, \qquad (2.34)$$

pentru circuitul $LC$ ($R = 0$):

$$I = \frac{U}{|X_L - X_C|}, \; X_L \neq X_C, \; \text{tg}\varphi \to \pm\infty, \varphi \to \pm\frac{\pi}{2}. \qquad (2.35)$$

Diagramele fazoriale pentru aceste circuite serie sunt reprezentate în *figura 2.11, a, b, c*, corespunzător. Dacă în diagramele din *figura 2.10* a fost folosită regula paralelogramului pentru adunarea vectorilor, atunci în cele din *figura 2.11* s-a aplicat regula triunghiului.

### f. Rezonanţa tensiunilor. Factorul de calitate

Să analizăm legea lui Ohm (2.29) din punctul de vedere al variaţiei pulsaţiei ω sau al frecvenţei ν = ω/2π. Indiferent de valorile inductanţei $L$ şi capacităţii $C$, întotdeauna se poate găsi o astfel de pulsaţie (frecvenţă), pentru care reactanţele inductivă şi capacitivă vor fi egale. În *figura 2.12* este reprezentată intensitatea curentului $I$ (2.29) în funcţie de pulsaţia ω. Se observă că în vecinătatea unei pulsaţii $\omega_r$ intensitatea curentului creşte brusc şi pentru $\omega = \omega_r$ devine maximă. Acest fenomen este numit **rezonanţă**, iar frecvenţa la care acesta se produce este numită **frecvenţă de rezonanţă**.

Din egalitatea reactanţelor capacitivă şi inductivă $X_L = X_C$ rezultă că $\omega^2 = 1/LC$, de unde pentru pulsaţia şi frecvenţa de rezonanţă obţinem:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ sau } \nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (2.36)$$

Înlocuind în legea lui Ohm (2.29) pulsaţia ω cu cea de rezonanţă $\omega_r$ din relaţia (2.36), obţinem valoarea curentului de rezonanţă:

$$I_r = \frac{U}{R}. \qquad (2.37)$$

Astfel, cu cât este mai mică rezistenţa circuitului $R$, numită şi rezistenţă activă, cu atât curba de rezonanţă este mai ascuţită, iar intensitatea curentului la rezonanţă – mai mare.

Din *figura 2.10, c* se observă că pentru realizarea rezonanţei este necesară egalitatea tensiunilor pe bobină şi condensator, oricare ar fi valorile lor. Să determinăm aceste tensiuni în condiţii de rezonanţă. Introducând (2.36) şi (2.37) în (2.28) pentru cele două tensiuni, obţinem:

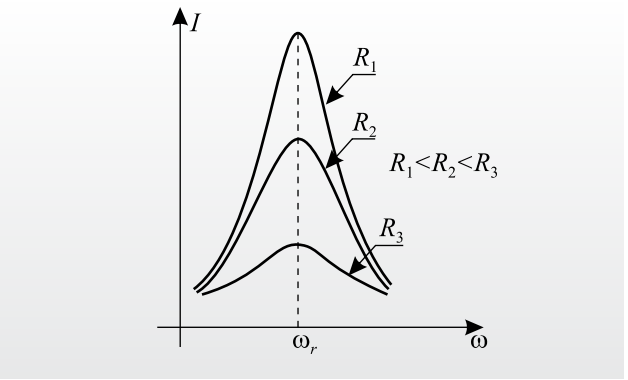



*Fig. 2.12*

$$U_{L,r} = \omega_r L I_r = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}U,$$
$$U_{C,r} = \frac{I_r}{\omega_r C} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}U. \qquad (2.38)$$

Observăm că tensiunile de la bornele bobinei şi de la cele ale condensatorului devin maxime, iar valorile lor sunt cu atât mai mari, cu cât rezistenţa circuitului este mai mică. Din această cauză, rezonanţa în circuitele serie mai este numită **rezonanţa tensiunilor**.

Raportul

$$Q = \frac{U_{L,r}}{U} = \frac{U_{C,r}}{U} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (2.39)$$

arată de câte ori tensiunea de la bornele bobinei sau condensatorului este mai mare decât tensiunea de alimentare a unui circuit serie în regim de rezonanţă şi se numeşte **factor de calitate** sau **factor de supratensiune**.

Fenomenul de rezonanţă în circuitele $RLC$ serie are o importanţă deosebită în radiotehnică. Dacă în circuit se utilizează un condensator de capacitate variabilă sau/şi o bobină de inductanţă variabilă, atunci din (2.36) rezultă că circuitul poate fi acordat la diferite frecvenţe de rezonanţă. Astfel, de exemplu, se realizează acordarea aparatelor de radio şi a televizoarelor la frecvenţa staţiei preferate.

Există însă şi situaţii când sunt necesare măsuri pentru înlăturarea rezonanţei. De exemplu, în instalaţiile pentru transportarea şi utilizarea curentului electric alternativ, apariţia supratensiunilor poate genera descărcări electrice între spirele bobinelor din transformatoare sau între armăturile condensatoarelor şi, prin urmare, defectarea acestora.

## Probleme rezolvate

❶ La o sursă de tensiune alternativă $u = 60\sin 100\pi t\ (\mathrm{V})$ este conectată o bobină. Intensitatea curentului prin circuitul format este $i = 5\sin 2\pi\left(50t + 1/8\right)\ (\mathrm{A})$. Determinaţi: a) frecvenţa şi defazajul dintre curent şi tensiune, precum şi valorile efective ale curentului şi tensiunii din circuit; b) rezistenţa şi inductanţa bobinei.

**Se dă:**

$u = 60\sin 100\pi t\ (\mathrm{V})$,
$i = 5\sin 2\pi\left(50t + 1/8\right)\ (\mathrm{A})$

*a*) $\nu$ – ?, $\varphi$ – ?, $I$ – ?, $U$ – ?;
*b*) $R$ – ?, $L$ – ?

**Rezolvare:**

**a)** Comparând tensiunea şi intensitatea instantanee a curentului din problema dată cu cele de formă generală, obţinem:

$$U_m = 60\ \mathrm{V},\ I_m = 5\ \mathrm{A},\ \omega = 100\pi\,(s^{-1}),\ \varphi = \pi/4.$$

Valorile maxime $U_m$ şi $I_m$ se exprimă prin cele efective conform relaţiilor (2.7) şi (2.8), iar $\omega = 2\pi\nu$. Aşadar,

$$\nu = 50\ \mathrm{Hz},\ \varphi = \frac{\pi}{4},\ U = \frac{60}{\sqrt{2}} \approx 42,4(\mathrm{V}),\ I = \frac{5}{\sqrt{2}} \approx 3,5(\mathrm{A}).$$

**b)** Din diagrama fazorială a circuitului cu rezistor şi bobină (*fig. 2.11, a*) rezultă

$$U_R = U\cos\varphi \ \text{ şi } \ U_L = U\sin\varphi.$$

Întrucât $U_R = IR$, iar $U_L = I\omega L$, din relaţia precedentă avem:

$$R = \frac{U}{I}\cos\varphi \ \text{ şi } \ L = \frac{U}{\omega I}\sin\varphi.$$

Înlocuind valorile numerice, se obţine $R \approx 8,6\ \Omega$ şi $L \approx 27,3\ \mathrm{mH}$.

❷ Un circuit serie, alcătuit dintr-un rezistor $R$ şi un condensator de capacitate egală cu 100 μF, este alimentat cu un curent alternativ de frecvenţă $\nu = 50\ \mathrm{Hz}$ şi este caracterizat de un defazaj $\varphi = -60^0$. Determinaţi: a) reactanţa capacitivă; b) valoarea rezistenţei $R$; c) valoarea inductanţei unei bobine ce trebuie introdusă în serie pentru a înlătura defazajul existent.

**Se dă:**

$C = 10^{-4}$ F,
$\nu = 50$ Hz,
$\varphi = -60^o$

*a*) $X_C$ – ?;
*b*) $R$ – ?;
*c*) $L$ – ?

**Rezolvare:**

**a)** Deoarece $\omega = 2\pi\nu$, din definiţia reactanţei capacitive obţinem:

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C};\ \ X_C \approx 31,8\,\Omega.$$

**b)** Pentru circuitul *RC* serie, defazajul dintre tensiune şi curent este determinat de relaţia (2.34), din care avem:

$$R = -\frac{X_C}{\mathrm{tg}\varphi} = \frac{31,8}{\sqrt{3}} \approx 18,4\,(\Omega).$$

**c)** La introducerea bobinei în circuit, defazajul dintre tensiunea de alimentare şi intensitatea curentului se modifică. Deoarece circuitul devine de tipul *RLC* serie, defazajul este determinat de relaţia (2.32). Întrucât după introducerea în circuit a bobinei defazajul trebuie să fie egal cu zero, din (2.32) reiese că $X_L = X_C$ sau $2\pi\nu L = X_C$.

Din această relaţie obţinem:

$$L = \frac{X_C}{2\pi\nu} = \frac{31,8}{100\pi} \approx 0,1(\mathrm{H}).$$

❸ În *figura 2.13, a* este reprezentată schema unui circuit serie în curent alternativ. Reactanţele şi rezistenţele elementelor de circuit sunt: $X_L = 60\,\Omega$, $X_{C1} = 30\,\Omega$, $R_1 = 120\,\Omega$, $X_{C2} = 90\,\Omega$, $R_2 = 60\ \Omega$, iar tensiunea pe rezistorul $R_2$ este de 90 V. Construiţi diagrama fazorială a circuitului şi determinaţi: a) impedanţa circuitului; b) intensitatea curentului şi tensiunea de alimentare; c) defazajul dintre intensitate şi tensiune.

**Se dă:**

$X_L = 60\ \Omega$,
$X_{C1} = 30\ \Omega$,
$R_1 = 120\ \Omega$,
$X_{C2} = 90\ \Omega$,
$R_2 = 60\ \Omega$,
$U_{R2} = 90$ V

*a*) $Z$ – ?;
*b*) $I$ – ?, $U$ – ?;
*c*) $\varphi$ – ?

**Rezolvare:**

Pentru construirea diagramei fazoriale se ia o direcţie arbitrară, de-a lungul căreia din originea *O* este depus fazorul intensităţii curentului. Din aceeaşi origine (*fig. 2.13, b*) se depun mai întâi fazorii corespunzători fiecărui element individual de circuit, luând în considerare şi defazajul introdus de bobină (în avans cu $\pi/2$) şi condensator (în devans cu $\pi/2$). Însumând vectorial fazorii situaţi de-a lungul aceloraşi direcţii, obţinem diagrama fazorială a circuitului analizat.

**a)** Din diagrama fazorială (*fig. 2.13, b*) rezultă:

$$U = \sqrt{\left(U_{R1} + U_{R2}\right)^2 + \left(U_L - U_{C1} - U_{C2}\right)^2}.$$

Întrucât circuitul este în serie, intensitatea curentului este aceeaşi prin toate elementele. Atunci din relaţia precedentă obţinem:

$$U = I\sqrt{\left(R_1 + R_2\right)^2 + \left(X_L - X_{C1} - X_{C2}\right)^2} = IZ.$$

Aşadar

$$Z = \sqrt{\left(R_1 + R_2\right)^2 + \left(X_L - X_{C1} - X_{C2}\right)^2} \approx 190\ \Omega.$$

**b)** Tensiunea pe rezistorul $R_2$ este cunoscută. Atunci intensitatea curentului prin acest rezistor şi deci prin întreg circuitul este:

$$I = \frac{U_{R2}}{R_2} = 1,5\ \mathrm{A},$$

iar tensiunea de alimentare $U = IZ \approx 285$ V.

**c)** Tot din diagrama fazorială avem:

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{U_L - U_{C1} - U_{C2}}{U_{R1} + U_{R2}} = \frac{X_L - X_{C1} - X_{C2}}{R_1 + R_2} = -\frac{1}{3}.$$

Atunci $\varphi = -\mathrm{arctg}\left(\frac{1}{3}\right) \approx -0,32\,\mathrm{rad}$.

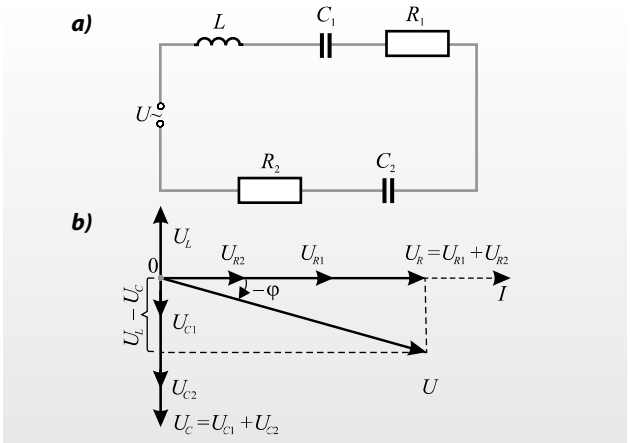



*Fig. 2.13*

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce condiţie trebuie să îndeplinească curentul alternativ pentru ca legea lui Ohm să fie valabilă?
2. Care sunt particularităţile comportamentului elementelor de circuit în curent alternativ faţă de cele în curent continuu?
3. Care este defazajul introdus în circuitul de curent alternativ de către fiecare element individual al acestuia?
4. Ce se numește *reactanţă inductivă* și care este semnificaţia ei?
5. Explicaţi diagrama fazorială a circuitului compus dintr-o bobină ideală.
6. Ce reprezintă reactanţa capacitivă? Explicaţi diagrama fazorială în acest caz.
7. Cum se construiește diagrama fazorială în cazul circuitului *RLC* serie? Evidenţiaţi cazurile circuitelor preponderent inductiv sau capacitiv.
8. Care este expresia legii lui Ohm în cazul circuitului de curent alternativ?
9. Ce se numește *impedanţă a circuitului* și care este semnificaţia ei?
10. Care este expresia defazajului dintre tensiunea de alimentare și intensitatea curentului stabilit în circuitul *RLC* serie?
11. Ce reprezintă fenomenul de rezonanţă în circuitul *RLC* serie și în ce condiţii se manifestă? Cu ce este egal defazajul în regim de rezonanţă?
12. Care este expresia frecvenţei de rezonanţă? De ce parametri depinde ea?
13. Care este intensitatea curentului la rezonanţă? Cum se comportă în acest caz tensiunile la bornele bobinei și condensatorului din circuit?
14. Ce se numește *factor de calitate* și ce arată el?
15. La o sursă de curent alternativ cu valoarea efectivă a tensiunii de 220 V este conectat un rezistor cu rezistenţa de 11 kΩ. Care sunt valorile efectivă și de amplitudine ale intensităţii curentului?
16. Determinaţi reactanţa inductivă a unei bobine cu inductanţa de 20 mH la parcurgerea ei de către un curent alternativ de frecvenţă $\nu = 50$ Hz .
17. Care este frecvenţa curentului alternativ printr-un condensator de capacitate $C = 250$ μF, dacă el este caracterizat de o reactanţă capacitivă de 40 Ω?
18. Un circuit *RL* serie cu rezistorul de rezistenţă $R = 10\,\Omega$ și o bobină ideală este conectat la o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 36 V și frecvenţa $\nu = 50$ Hz. Tensiunea efectivă la bornele rezistorului este de 20 V. Determinaţi impedanţa circuitului, inductanţa bobinei și defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului.
19. Într-un circuit *RC* serie în curent alternativ de frecvenţă $\nu = 50$ Hz, tensiunile efective la bornele rezistorului și condensatorului sunt, respectiv, de 90 și 120 V. Știind că intensitatea efectivă a curentului din circuit este de 0,5 A, determinaţi: capacitatea condensatorului, defazajul din circuit și tensiunea de alimentare.
20. Un circuit *RLC* serie caracterizat de valorile $R = 100\,\Omega$, $L = 25$ mH și $C = 50$ μF este conectat la o sursă de curent alternativ, având tensiunea efectivă de 220 V și frecvenţa $\nu = 50$ Hz. Care este intensitatea curentului prin acest circuit?

## 2.4.* PUTEREA ÎN CIRCUIT DE CURENT ALTERNATIV

Considerăm un circuit *RLC* arbitrar, la bornele căruia se aplică tensiunea alternativă $u = U_m \sin(\omega t+\varphi)$. Prin circuit se stabilește curentul de intensitate $i = I_m \sin\omega t$. Menţionăm că defazajul φ dintre intensitatea curentului și tensiune poate lua valori atât pozitive, cât și negative.

Puterea instantanee din circuit se exprimă, conform definiţiei, prin produsul dintre intensitatea curentului și tensiune, adică

$$p = ui = U_m I_m \sin\omega t \cdot \sin\left(\omega t + \varphi\right).$$

Folosind relaţia trigonometrică

$$\sin\alpha \cdot \sin\beta = \frac{1}{2}\left[\cos\left(\alpha-\beta\right) - \cos\left(\alpha+\beta\right)\right],$$

pentru puterea instantanee obţinem:

$$p = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi - \frac{1}{2} I_m U_m \cos\left(2\omega t + \varphi\right). \quad (2.40)$$

Din (2.40) se observă că puterea instantanee este caracterizată de doi termeni: unul constant în timp și altul alternativ cu o pulsaţie dublă faţă de cea a curentului. Datorită termenului alternativ, puterea instantanee poate lua valori atât pozitive, cât și negative. Însă, într-un interval oarecare de timp, în circuit se va debita o anumită putere medie. Cu alte cuvinte, puterea instantanee într-un circuit

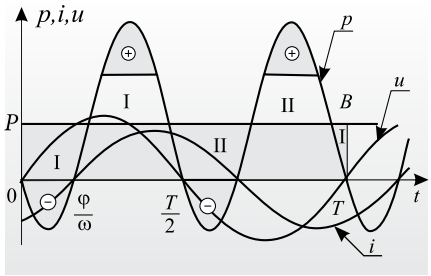



Fig. 2.14

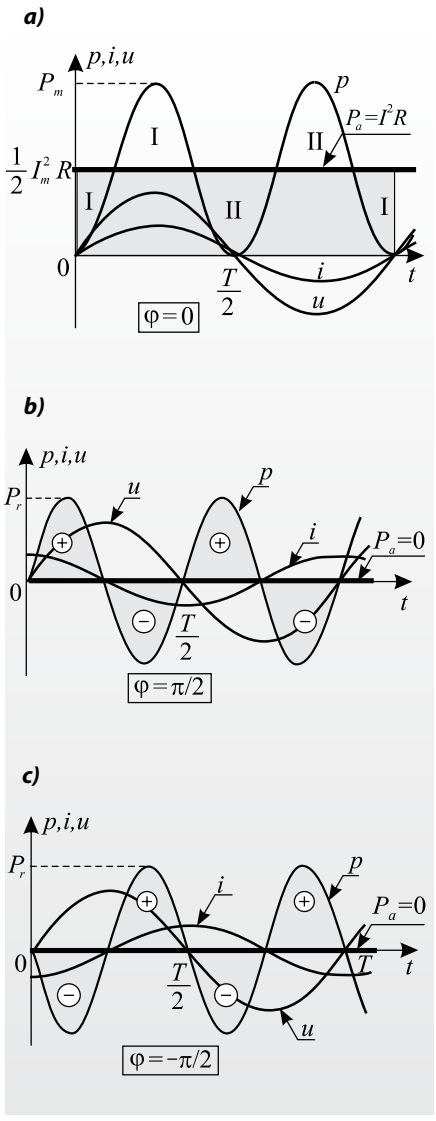



Fig. 2.15

de curent alternativ reprezintă o variaţie periodică a valorii sale numerice în jurul unei valori medii. Aceasta se observă uşor din *figura 2.14,* unde sunt reprezentate intensitatea, tensiunea şi puterea curentului alternativ în funcţie de timp. Pentru intervalul de timp egal cu o perioadă, ariile suprafeţelor I şi II situate deasupra liniei $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi$ le completează pe cele dintre abscisă şi această linie, iar ariile notate cu semnul „+" le anulează pe cele cu semnul „–" de sub axa absciselor (*fig. 2.14*). Astfel, aria dreptunghiului *OPBT* reprezintă energia medie absorbită în circuitul de curent alternativ în decursul unei perioade:

$$W = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi \cdot T.$$

Aşadar, valoarea medie a puterii dintr-un circuit de curent alternativ, numită şi **putere activă**, este:

$$P_a \equiv \overline{p} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi$$

sau, în valori efective ale curentului şi tensiunii:

$$P_a = UI \cos\varphi. \qquad (2.41)$$

Mărimea cos φ din (2.41) este numită **factor de putere**. Întrucât $0 \le |\varphi| \le \pi/2$, factorul de putere este întotdeauna pozitiv şi subunitar.

Cu cât defazajul dintre tensiune şi intensitatea curentului este mai mic, cu atât mai mare este puterea activă. Valoarea maximă a factorului de putere egală cu unitatea se obţine când defazajul din circuit este nul, adică la rezonanţă.

***Factorul de putere*** **reprezintă o caracteristică a eficacităţii transferului de putere de la sursa de alimentare către circuit.**

După cum rezultă din (2.41) şi din *figura 2.15, a*, puterea activă este maximă şi pentru circuitele pur rezistive (fără bobine şi condensatoare). Într-adevăr, deoarece φ = 0, pentru puterea activă avem:

$$P_a = \frac{1}{2} P_m = \frac{1}{2} I_m U_m = \frac{1}{2} I_m^2 R = I^2 R.$$

În cazul unui circuit ideal ce conţine numai o bobină de inductanţă *L* (φ = π/2) sau numai un condensator de capacitate *C* (φ = –π/2), pentru puterea instantanee disipată, din (2.40) obţinem, respectiv:

$$p_L = -\frac{1}{2} I_m U_{m,L} \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} I_m U_{m,L} \sin 2\omega t = I^2 X_L \sin 2\omega t;$$

$$p_C = -\frac{1}{2} I_m U_{m,C} \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{2} I_m U_{m,C} \sin 2\omega t = -I^2 X_C \sin 2\omega t.$$

Valorile medii ale acestor mărimi în decurs de o perioadă sunt nule, adică în astfel de circuite puterea activă este egală cu zero. Acest rezultat se observă uşor din *figura 2.15, b, c*. Defazajul de π/2 dintre intensitatea curentului şi tensiune determină o alternare a sferturilor de perioadă în decursul cărora energia primită de bobină sau de condensator în timpul unei alternanţe pozitive este complet restituită generatorului în decursul alternanţei negative. Evident că în circuitele reale (orice bobină sau condensator posedă şi o rezistenţă oare-

care) energia nu este restituită complet sursei de alimentare, ci numai parţial, în funcţie de valoarea rezistenţei active din circuit.

**Valoarea de amplitudine a puterii transferată alternativ între generator şi elementele reactive (condensatorul şi bobina) ale circuitului se numeşte *putere reactivă*.**

În diagramele fazoriale pentru circuitul *RLC* serie (*fig. 2.10*) se evidenţiază triunghiul dreptunghic al tensiunilor ce conţine defazajul φ. Dacă laturile acestui triunghi se înmulţesc cu *I*, atunci triunghiul obţinut este numit **triunghiul puterilor**. În *figura 2.16* este reprezentat triunghiul puterilor pentru circuitul *RLC* serie preponderent inductiv. Din acest triunghi rezultă că puterea reactivă este dată de relaţia

$$P_r = UI \sin\varphi, \qquad (2.42)$$

iar puterea maximă posibilă debitată de sursa de alimentare a circuitului, numită **putere aparentă**, – de relaţia

$$P = UI. \qquad (2.43)$$

Puterile aparentă, activă şi reactivă se exprimă între ele prin intermediul relaţiilor ce se obţin uşor din triunghiul puterilor (*fig. 2.16*):

$$P^2 = P_a^2 + P_r^2;\ P_r = P_a \operatorname{tg}\varphi;\ P_a = P\cos\varphi;\ P_r = P\sin\varphi. \qquad (2.44)$$

Din (2.41)–(2.43) se observă că dimensiunile puterilor activă, reactivă şi aparentă sunt aceleaşi – $[U]\cdot[I] = \text{V}\cdot\text{A}$, însă pentru evitarea neclarităţilor la indicarea valorilor acestora pentru ele au fost adoptate unităţi diferite. Astfel, în SI pentru puterea activă se foloseşte unitatea tradiţională – **wattul** (**W**): $[P_a] = [U]\cdot[I] = \text{V}\cdot\text{A} \equiv \text{W}$. Unitatea de putere reactivă a fost numită **volt-amper-reactiv** (**VAR**): $[P_r] = [U]\cdot[I] = \text{V}\cdot\text{A} \equiv \text{VAR}$, iar a puterii aparente – **volt-amper** (**VA**): $[P] = [U]\cdot[I] = \text{V}\cdot\text{A} \equiv \text{VA}$.

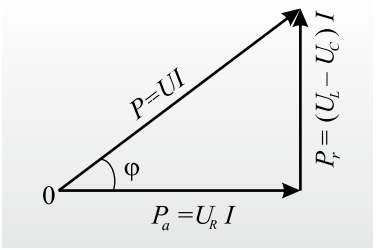



*Fig. 2.16*

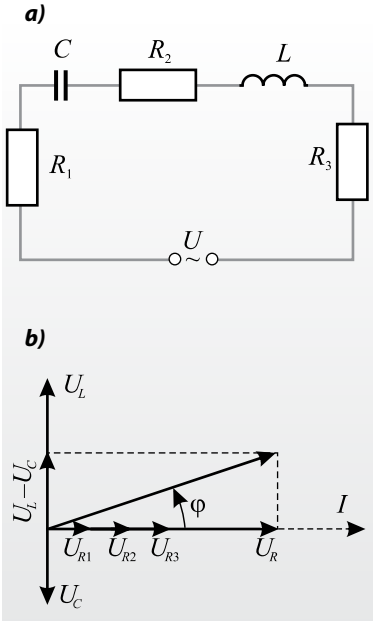



*Fig. 2.17*

## Problemă rezolvată

Circuitul serie reprezentat în *figura 2.17, a* este parcurs de un curent alternativ de intensitate efectivă $I = 10$ A şi frecvenţa de 50 Hz. Cunoscând că $R_1 = 2\ \Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$, $R_3 = 6\ \Omega$, $L = (0{,}3/2\pi)$ H şi $C = (1/\pi)\cdot 10^{-3}$ F, determinaţi: a) factorul de putere al circuitului; b) puterile activă, reactivă şi aparentă din circuitul menţionat.

**Se dă:**

$I = 10$ A,
$\nu = 50$ Hz,
$R_1 = 2\ \Omega$,
$R_2 = 4\ \Omega$,
$R_3 = 6\ \Omega$,
$L = (0{,}3/2\pi)$ H,
$C = (1/\pi)\cdot 10^{-3}$ F

*a*) $\cos\varphi$ – ?;
*b*) $P_a$ – ?, $P_r$ – ?, $P$ – ?

**Rezolvare:**

**a**) Luând în considerare relaţiile de definiţie ale reactanţelor inductivă (2.16) şi capacitivă (2.21), precum şi legătura dintre pulsaţie şi frecvenţă $\omega = 2\pi\nu$, avem:

$$X_L = 2\pi\nu L = 15\,\Omega \text{ şi}$$
$$X_C = 1/(2\pi\nu C) = 10\ \Omega.$$

Rezultă că circuitul studiat este preponderent inductiv şi diagrama lui fazorială are aspectul reprezentat în *figura 2.17, b*. Din această diagramă, pentru factorul de putere, reiese următoarea relaţie:

$$\cos\varphi = \frac{U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3}}{U}.$$

Întrucât $U_{R_1} = IR_1$, $U_{R_2} = IR_2$, $U_{R_3} = IR_3$ şi $U = IZ$, unde

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

este impedanţa circuitului, pentru factorul de putere obţinem:

$$\cos\varphi = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{Z} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 5^2}} \approx 0{,}92.$$

**b)** Tensiunea la bornele sursei de alimentare este $U = IZ = 130$ V. Înlocuind valorile numerice în relaţiile (2.41) şi (2.43) pentru puterile activă şi aparentă, obţinem: $P_a \approx 1{,}2$ kW şi $P = 1\,300$ VA. Puterea reactivă se determină uşor, din (2.44), şi anume:

$$P_r = \sqrt{P^2 - P_a^2} \approx 500 \text{ VAR}.$$

## Verificați-vă cunoștințele

1. Care este semnificaţia puterii active a unui circuit de curent alternativ și cu ce este egală ea?
2. Ce reprezintă factorul de putere și care sunt valorile posibile ale acestuia?
3. De ce în circuitele compuse numai din elemente reactive puterea activă este egală cu zero?
4. Ce reprezintă puterea reactivă a circuitului de curent alternativ și cu ce este egală ea?
5. Cum se obţine triunghiul puterilor?
6. Ce reprezintă puterea aparentă în circuitele de curent alternativ?
7. Care sunt unităţile adoptate în SI pentru puterea activă, reactivă și aparentă?
8. Un circuit serie format dintr-un condensator de capacitate $C = (5/9\pi)\cdot 10^{-3}$ F și o bobină de inductanţă $L = (0{,}3/\pi)$ H și rezistenţă $R = 16\ \Omega$ este alimentat la un generator cu tensiunea $U = 120$ V și frecvenţa $\nu = 50$ Hz. Calculaţi: a) impedanţa circuitului; b) intensitatea curentului din circuit; c) factorul de putere al circuitului; d) puterile activă, reactivă și aparentă.
9. Un circuit serie este format dintr-un rezistor și o bobină cu rezistenţă neglijabilă. Dacă acest circuit este alimentat la o tensiune alternativă, având valoarea efectivă $U = 240$ V, defazajul dintre tensiune și curent este $\varphi_1 = \pi/3$. Dacă însă în circuit se conectează în serie și un condensator cu reactanţa $X_C = 8\sqrt{3}\,\Omega$, defazajul devine $\varphi_2 = \pi/6$. Determinaţi: a) rezistenţa rezistorului; b) reactanţa bobinei; c) puterile activă, reactivă și aparentă pentru circuitul care conţine și condensator, dacă se cunoaște că acesta este preponderent inductiv.

# 2.5. TRANSPORTUL ENERGIEI ELECTRICE LA DISTANŢE MARI

## a. Generatorul de curent alternativ

**Generatorul de curent alternativ** sau **alternatorul** reprezintă un dispozitiv care transformă energia mecanică în energie electrică.

Elementele de bază ale oricărui alternator (*fig. 2.18, a*) sunt: 1) sursa de câmp magnetic (magneţi permanenţi sau electromagneţi), numită **inductor**; 2) cadrul metalic (o bobină în care se induce *t.e.m.*), numit **indus**; 3) **inelele** metalice **de contact** și periuţele alunecătoare pe ele. Partea mobilă a generatorului este numită **rotor**, iar cea fixă – **stator**.

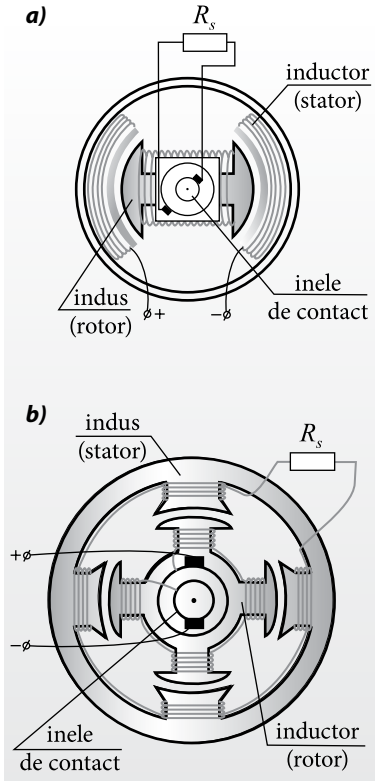



*Fig. 2.18*

Inductorul și indusul reprezintă niște miezuri confecţionate din oţel, pe care sunt înfășurate bobinele cu numărul necesar de spire. Pentru asigurarea unui flux magnetic maxim, indusul și inductorul se construiesc de o asemenea formă geometrică, încât distanţa dintre ele să fie cât mai mică (*fig. 2.18, a*). În acest caz, vectorul inducţiei magnetice $\vec{B}$ este mereu aproximativ perpendicular pe vectorul vitezei liniare $\vec{v}$ a punctelor de pe suprafaţa indusului, asigurând, astfel, variaţia sinusoidală a *t.e.m.* Miezurile de oţel au și ele o construcţie specială. Pentru micșorarea intensităţii curenţilor turbionari și, respectiv, a pierderilor de energie, miezurile sunt confecţionate din plăci subţiri (tole) de oţel, izolate între ele.

Frecvenţa *t.e.m.* generată de alternator depinde de viteza de rotaţie a rotorului. Pentru obţinerea curentului alternativ de frecvenţă industrială ($\nu = 50$ Hz), rotorul (un electromagnet cu doi poli) trebuie să efectueze 50 rot/s, adică 3 000 rot/min. Asemenea turaţii mari însă nu pot fi întotdeauna realizate. Această dificultate este înlăturată prin utilizarea electromagneţilor cu mai mulţi poli magnetici 4, 6, 8, … . (În *figura 2.18, b* este reprezentat schematic alternatorul cu 4 poli.) Perioada curentului alternativ generat în fiecare caz va fi egală cu timpul necesar pentru rotirea rotorului cu 1/2, 1/3, 1/4, … din lungimea cercului. Atunci, pentru obţinerea curentului alternativ de aceeași frecvenţă, viteza de rotaţie a rotorului va fi de 2, 3, 4, … ori mai mică.

## b. Randamentul liniei de transport. Impactul asupra organismelor vii

Energia electrică este produsă cu ajutorul generatoarelor la centrale electrice mari, amplasate, de obicei, în apropierea resurselor energetice naturale, iar consumatorii se află la anumite distanţe de la ele. Astfel, utilizarea energiei electrice necesită construcţia unor **linii de transport** al acesteia.

Orice linie de transport este caracterizată de pierderi de energie din cauza efectului termic al curentului electric: $Q = I^2Rt$. Aceste pierderi pot fi reduse prin micşorarea rezistenţei conductoarelor din care este alcătuită linia de transport sau a intensităţii curentului. Dacă $l$ este lungimea liniei, iar $S$ este aria secţiunii transversale a conductoarelor folosite, atunci $R = \rho\left(2l/S\right)$ şi pierderile de putere prin efect termic într-o linie cu două conductoare sunt caracterizate de relaţia:

$$\Delta P = \frac{Q}{t} = \rho\frac{2l}{S}I^2,$$

unde ρ este rezistivitatea conductoarelor. Întrucât lungimea liniei de transport este impusă de distanţa dintre consumator şi generator, rezistenţa liniei poate fi micşorată numai datorită măririi ariei secţiunii transversale a conductoarelor, adică majorării masei de metal folosit. Aceasta însă nu este rentabil din punct de vedere tehnic şi economic. Rezultă că unica modalitate de reducere a pierderilor este micşorarea intensităţii curentului.

Puterea curentului electric este egală cu produsul dintre intensitate şi tensiune şi, pentru a menţine constantă puterea curentului electric din linia de transport, este necesar să mărim tensiunea de atâtea ori, de câte ori micşorăm intensitatea curentului.

Tensiunile înalte, necesare în cazul transportului energiei electrice, nu pot fi obţinute direct la generatoarele de curent alternativ, dar nici nu sunt necesare pentru consumatori, aceştia folosind tensiuni mult mai joase. Din această cauză un element important al liniei de transport este dispozitivul de ridicare (coborâre) a tensiunii, numit **transformator**. În *figura 2.20* este reprezentată schematic o linie de tensiune înaltă. În fiecare caz tensiunea din linia de transport este determinată de puterea transmisă şi de distanţa la care trebuie transportată energia electrică, dar întotdeauna ea este de ordinul sutelor de mii de volţi.

Deoarece necesităţile consumatorilor sunt diferite, staţiunile de micşorare a tensiunii funcţionează în trepte. Astfel, pentru consumatorii mari se construiesc linii de transport cu tensiuni de ordinul zecilor de mii de volţi, iar consumatorii mici se alimentează de la linii cu tensiunea de 220 V.

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

*Generatorul de curent continuu* se deosebește de alternator numai prin construcția colectorului (*fig. 2.19*). Cele două inele pe care alunecă periuțele $p_1$ și $p_2$ (v. *fig. 2.1*) se înlocuiesc cu două semiinele, numite *lamele* (*fig. 2.19, a*), fiecare dintre ele conectându-se la capetele cadrului metalic. Lamelele se rotesc împreună cu cadrul, iar periuțele rămân fixe. După un timp egal cu o jumătate de perioadă, sensul curentului prin laturile active ale cadrului se modifică, dar în același timp și semiinelele își schimbă locurile. Astfel, la periuța $p_1$ tot timpul va fi un potențial negativ, iar la periuța $p_2$ – pozitiv. Cu toate că prin circuitul exterior curentul are permanent același sens (continuu), după fiecare jumătate de perioadă *t.e.m.* și intensitatea curentului au valori nule (*fig. 2.19, a*). Cu alte cuvinte, variația alternativă a *t.e.m.* și a intensității curentului este transformată de către colector într-o variație, numită *pulsatorie*.

Pentru obținerea unui curent continuu de pulsații mici se iau mai multe bobine (cadre metalice) așezate sub unghiuri egale una față de alta. În acest caz, colectorul reprezintă un inel secționat, numărul de lamele fiind egal cu numărul bobinelor. În *figura 2.19, b* este reprezentat colectorul cu patru lamele. Un generator cu asemenea colector, la care se conectează patru bobine, va genera un curent continuu de intensitate minimă diferită de zero și pulsații evident mai mici.

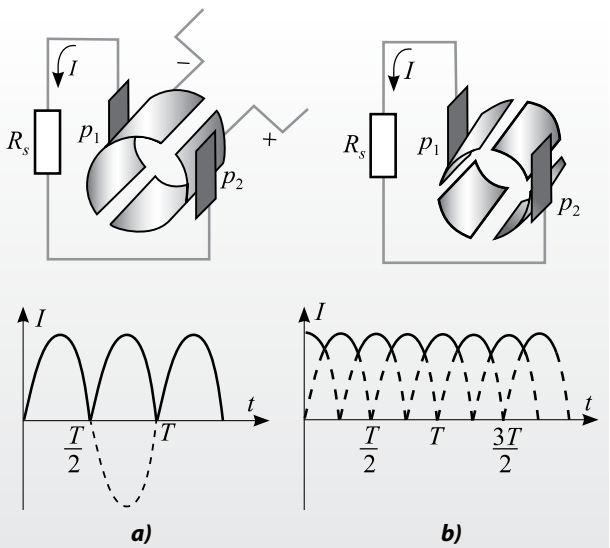



*Fig. 2.19*

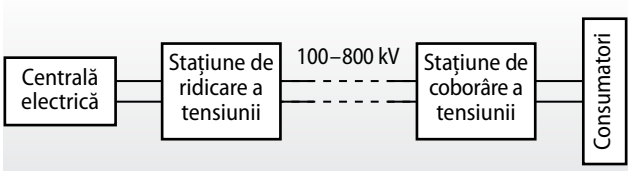



*Fig. 2.20*

De rând cu problemele tehnice analizate mai sus este necesar să menţionăm şi problemele legate de impactul liniilor de transport al energiei electrice asupra mediului înconjurător şi, în special, asupra organismelor vii. Principalele tipuri de poluări ale mediului înconjurător sunt: *poluarea sonoră* (zgomote produse de conductoarele liniei electrice şi, în special, de transformatoare, de descărcarea în coroană pe liniile de înaltă tensiune); *poluarea electromagnetică* (perturbaţii radio şi ale emisiunilor de televiziune, influenţa câmpurilor electric şi magnetic asupra organismelor vii); *poluarea ecologică* (ocuparea terenurilor, defrişarea pădurilor ş.a.).

Problemele legate de influenţa câmpurilor electric şi magnetic asupra organismelor vii formează obiectul unor cercetări speciale începute relativ nu de mult. Studiile efectuate în cazul influenţei câmpurilor electrice intense asupra organismului uman au scos în evidenţă simptome de oboseală, slăbiciune, scăderea atenţiei, senzaţii de ameţeală şi insomnii. În prezent se consideră că pentru om nu există pericole doar în cazul câmpurilor electrice cu intensităţi de până la 5 kV/m. Acţiunea câmpului magnetic asupra organismelor vii încă nu este studiată complet, de aceea nu sunt stabilite nici limitele admise şi nici efectele concrete ale acestuia.

## c. Transformatorul

O aplicaţie practică foarte importantă a fenomenului inducţiei electromagnetice este transformatorul. În *figura 2.21* sunt reprezentate: a) construcţia transformatorului; b) simbolul lui în schemele electrice. Cel mai simplu transformator constă din două bobine cu numărul de spire diferit $N_1$ şi $N_2$, înfăşurate pe acelaşi miez de fier ce formează un circuit magnetic închis. Circuitul format din sursa de alimentare şi una din bobinele transformatorului este numit **primar**, iar cel format de a doua bobină şi consumator – **secundar**. În funcţie de necesităţi, pe acelaşi miez pot fi înfăşurate mai multe bobine. În asemenea cazuri transformatorul conţine un singur circuit primar şi mai multe secundare. Dacă la transformator nu este conectat niciun consumator, adică circuitul secundar este întrerupt, atunci se spune că transformatorul funcţionează în gol.

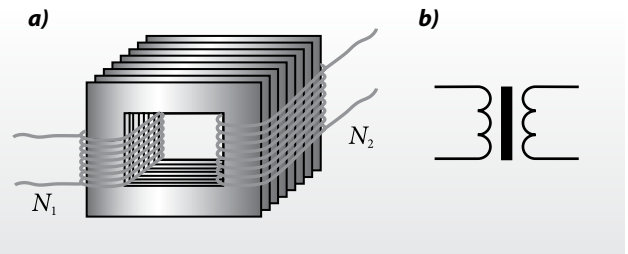



*Fig. 2.21*

Să presupunem că bobina cu $N_1$ spire este conectată la o sursă de tensiune alternativă $u_1$ şi transformatorul funcţionează în gol. În circuitul primar apare curentul de intensitate $i_1$ care generează un flux magnetic variabil $\Phi = \Phi_m \cos\omega t$. Acest flux străbate spirele ambelor bobine indiferent de existenţa miezului de fier. Rolul acestuia este de a mări valoarea de amplitudine a fluxului magnetic şi, în acelaşi timp, de a concentra liniile de inducţie magnetică ale câmpului. Astfel, atât bobina circuitului primar, cât şi a celui secundar vor fi străbătute practic de acelaşi flux şi cuplajul magnetic dintre bobine devine mai eficient. Conform legii inducţiei electromagnetice, în bobinele primară şi secundară ale transformatorului apar, respectiv, *t.e.m.* de autoinducţie $e_1$ şi de inducţie $e_2$:

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ şi } e_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

unde $\Delta\Phi$ este variaţia fluxului magnetic printr-o spiră, aceeaşi pentru ambele bobine.

Din împărţirea acestor relaţii rezultă că raportul *t.e.m.* de autoinducţie din bobina primară şi cea de inducţie din bobina secundară este egal cu raportul numerelor corespunzătoare de spire:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \qquad (2.45)$$

La funcţionarea transformatorului în gol, curentul prin bobina secundară $i_2 = 0$, de aceea *t.e.m.* $e_2$ este egală cu tensiunea $u_2$ de la bornele ei. Prin bobina primară însă circulă curentul (numit de funcţionare în gol) de intensitate $i_1$ mică. Întrucât rezistenţa ei $R_1$ este, de obicei, foarte mică, căderea de tensiune $i_1 R_1 = e_1 + u_1 \approx 0$. Din acest motiv, valoarea *t.e.m.* $e_1$ este aproximativ egală cu cea a tensiunii de alimentare $u_1$, adică:

$$e_1 \approx -u_1. \qquad (2.46)$$

Semnul „–” arată că *t.e.m.* $e_1$ şi tensiunea de alimentare $u_1$ sunt în opoziţie de fază. Folosind relaţia (2.45), obţinem:

$$\frac{u_1}{u_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

sau pentru valorile efective:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = K. \qquad (2.47)$$

**Raportul *K* al tensiunilor de la bornele bobinelor transformatorului la funcţionarea lui în gol este numit *coeficient de transformare*.**

Pentru valoarea $K < 1$ din (2.47) rezultă că $U_2 > U_1$ şi transformatorul este numit **ridicător de tensiune**, iar pentru $K > 1$ rezultă $U_2 < U_1$ şi este numit **coborâtor de tensiune**. Transformatoarele caracterizate de raportul $K \approx 1$ sunt folosite pentru separarea electrică a circuitelor, cuplajul realizându-se doar prin inducţie electromagnetică. Asemenea transformatoare, de obicei, sunt folosite pentru acordarea circuitelor în radiotehnică.

Dacă la bornele bobinei secundare se conectează un consumator de rezistenţă $R_2$, prin circuitul secundar apare un curent de intensitate $i_2$, care generează un flux magnetic variabil $\Phi_2$. Acest flux modifică valoarea fluxului magnetic total din miezul transformatorului şi egalitatea aproximativă (2.46) nu are loc. Din această cauză valoarea efectivă $I_1$ a intensităţii curentului din circuitul primar creşte, generând un flux magnetic $\Phi_1$ prin spirele bobinei primare care, conform regulii lui Lentz, este în opoziţie de fază faţă de fluxul $\Phi_2$. Cu cât rezistenţa $R_2$ a consumatorului este mai mică (curentul $I_2$ este mai mare), cu atât curentul $I_1$ din circuitul primar devine mai mare. În timpul funcţionării transformatorului, în miezul lui se stabileşte o stare de echilibru dintre fluxurile magnetice $\Phi_1$ şi $\Phi_2$, astfel încât:

$$\Phi_1 \approx \Phi_2. \qquad (2.48)$$

În conformitate cu (1.21), fluxul magnetic este proporţional cu intensitatea curentului din bobină şi cu numărul ei de spire, adică $\Phi_1 \sim N_1 I_1$ şi $\Phi_2 \sim N_2 I_2$. Înlocuind aceste relaţii în (2.48) pentru coeficientul de transformare (2.47), obţinem:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K. \qquad (2.49)$$

Din (2.49) rezultă că dacă $U_2 << U_1$, atunci în bobina secundară a transformatorului (coborâtor de tensiune) se obţin curenţi de intensitate foarte mare. Asemenea transformatoare se folosesc în dispozitivele destinate pentru sudură electrică.

Întrucât produsul dintre tensiune şi intensitatea curentului semnifică puterea electrică, din (2.49) mai rezultă că puterea din circuitul primar este aproximativ egală cu puterea din cel secundar $P_1 \approx P_2$. Conchidem că energia furnizată consumatorului la bornele bobinei secundare este aproximativ egală cu cea din bobina primară. Evident, egalitatea aproximativă a puterilor din circuitele primar şi secundar este determinată de pierderile $\Delta P = P_1 - P_2$, care au loc în transformator. Cu cât pierderile în transformator sunt mai mici, cu atât randamentul lui $\eta$ este mai mare:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}.$$

În scopul reducerii pierderilor descrise mai sus, la construirea transformatoarelor se întreprind anumite măsuri de prevenire a acestora. Bobinele de tensiune joasă prin care circulă curenţi de intensitate înaltă se confecţionează din sârmă de cupru cu diametru mare, astfel micşorându-se pierderile prin efect termic. Miezul transformatorului se construieşte dintr-un aliaj special, numit **ferosiliciu**, sub formă de plăci subţiri (tole) izolate între ele, de obicei, cu lac. Funcţionând în condiţii nominale, transformatoarele au un randament foarte înalt, atingând valori de până la 98%.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce reprezintă generatorul de curent alternativ? Care sunt elementele lui de bază?
2. Cum se poate obţine curent alternativ de frecvenţă industrială la turaţii mici ale rotorului?
3. De ce nu este rentabilă reducerea pierderilor de energie în liniile de transport prin micşorarea rezistenţei conductoarelor?
4. De ce transportul energiei electrice la distanţe mari se realizează la tensiuni înalte?
5. Care sunt elementele de bază ale unei linii de transport a energiei de la centrala electrică până la consumator?
6. Ce reprezintă transformatorul şi care este construcţia lui? Care este principiul de funcţionare a transformatorului?
7. Ce se numeşte coeficient de transformare şi cum se clasifică transformatoarele în funcţie de valoarea lui?
8. Cum se defineşte randamentul transformatorului?
9. Bobina primară a unui transformator conţine 1 000 de spire şi este conectată la o sursă de alimentare de 220 V. Determinaţi coeficientul de transformare şi numărul de spire din bobina secundară, dacă la bornele ei tensiunea este de 1,1 kV.
10. Un transformator coborâtor de tensiune este conectat la o sursă de alimentare cu tensiunea de 220 V. Care este intensitatea curentului în circuitul primar, dacă în cel secundar circulă un curent de 22 A la o tensiune de 36 V?
11. Puterea consumată de un transformator este de 45 W. Determinaţi intensitatea curentului din circuitul bobinei secundare, dacă la bornele ei este o tensiune de 9 V, iar transformatorul funcţionează cu un randament de 95%.

Capitolul 3

# OSCILAȚII ȘI UNDE ELECTROMAGNETICE

## 3.1. OSCILAŢII ELECTROMAGNETICE

### a. Circuitul oscilant ideal

Studiind oscilaţiile mecanice, s-a constatat că ele sunt însoţite de un continuu proces de transformare a energiei potenţiale a oscilatorului în energie cinetică și invers. După cum vom vedea în continuare, circuitul închis compus dintr-un condensator și o bobină, numit **circuit oscilant**, de asemenea reprezintă o sursă de oscilaţii, dar însoţite de transformarea energiei câmpului electric în cea a câmpului magnetic și invers. De aceea asemenea oscilaţii au fost numite **oscilaţii electromagnetice libere**.

Menţionăm că în realitate toate circuitele oscilante posedă și o anumită rezistenţă electrică.

Pentru simplitate vom cerceta cazul unui circuit oscilant ideal, elementele căruia au rezistenţe foarte mici și acestea pot fi neglijate.

Să urmărim procesul de apariţie a oscilaţiilor electromagnetice într-un circuit oscilant ideal, comparându-l cu cel de apariţie a oscilaţiilor mecanice în cazul unui pendul elastic (*fig. 3.1*). Dacă în circuitul oscilant condensatorul nu este încărcat, atunci sistemul se află în stare de echilibru.

Admitem că, la momentul de timp $t = 0$, condensatorul de capacitate $C$, încărcat prealabil până la o tensiune $U_m$, are pe armături o sarcină $q_m = CU_m$ și este legat la bornele unei bobine de inductanţă $L$. Astfel, circuitului oscilant i s-a transmis o energie egală cu energia câmpului electric dintre armăturile condensatorului $q_m^2/(2C)$. Această stare a circuitului oscilant este echivalentă cu cea a pendulului elastic, scos din poziţia de echilibru la distanţa $-x_m$, fiindu-i transmisă energia potenţială $kx_m^2/2$, unde $k$ este constanta de elasticitate a resortului (*fig. 3.1, a*). Odată cu începerea descărcării condensatorului (micșorării sarcinii de pe armăturile lui), prin bobină circulă un curent, a cărui intensitate crește treptat, precum în cazul pendulului elastic se mărește viteza corpului. Micșorarea sarcinii și, respectiv, creșterea curentului nu se produce instantaneu din cauza fenomenului de autoinducţie provocat de variaţia în timp a curentului prin bobină. Într-adevăr, creșterea curentului prin bobină determină apariţia unui câmp magnetic variabil în timp. La rândul său, acest câmp magnetic generează un curent indus și, respectiv, un câmp electric. Conform regulii lui Lenz, curentul indus are un astfel de sens, încât fluxul magnetic produs de acesta se opune creșterii fluxului magnetic inductor, ceea ce împiedică descărcarea instantanee a condensatorului.

La momentul $t = T/4$ (*fig. 3.1, b*) pendulul elastic revine la poziţia de echilibru, unde viteza corpului este maximă, iar energia potenţială a resortului se transformă complet în energie cinetică $mv_m^2/2$. Analogic, în același moment, condensatorul este complet descărcat (sarcina de pe armături și tensiunea sunt nule), intensitatea curentului în bobină este maximă $i = I_m$, iar energia câmpului electric al condensatorului se transformă complet în energia câmpului magnetic al bobinei $LI_m^2/2$.

Continuând analogia cu pendulul elastic, observăm că în intervalul de timp de la $T/4$ până la $T/2$ corpul pendulului, mișcându-se după inerţie, comprimă resortul până la o deformaţie egală cu cea iniţială, dar în sens opus, adică cu $x_m$. Respectiv, energia

cinetică a pendulului se transformă în energie potenţială. În circuitul oscilant, micşorarea intensităţii curentului în acest interval de timp, conduce la apariţia unui curent indus, al cărui flux magnetic, conform regulii lui Lenz, se opune micşorării fluxului magnetic inductor. În consecinţă, tensiunea electromotoare de autoinducţie $e_a = -L\Delta i/\Delta t$ de la bornele bobinei încarcă condensatorul cu sarcini de semne opuse faţă de cum a fost încărcat iniţial. La momentul $t = T/2$, în circuitul oscilant tensiunea atinge valoarea maximă negativă $-U_m$, iar intensitatea curentului $i = 0$ (*fig. 3.1, c*).

În intervalul $(T/2, T)$ atât în cazul pendulului elastic, cât şi în circuitul oscilant se produc în aceeaşi ordine fenomene ce au avut loc în intervalul $(0, T/2)$, însă în sens contrar. Începând cu momentul $t = T/2$, condensatorul se descarcă şi energia câmpului electric din circuitul oscilant egală cu $q_m^2/(2C)$ descreşte. Tensiunea şi, respectiv, sarcina de pe armăturile condensatorului se micşorează, iar intensitatea curentului prin bobină creşte. La momentul $t = 3T/4$ sarcina şi tensiunea sunt nule, iar $i = -I_m$, adică curentul este maxim, dar de sens opus celui care circula prin circuit în primul sfert de perioadă. Energia circuitului oscilant este egală cu cea a câmpului magnetic $LI_m^2/2$ (*fig. 3.1, d*). După reîncărcarea condensatorului în intervalul de timp $(3T/4, T)$, energia câmpului magnetic iarăşi se transformă complet în energia câmpului electric şi circuitul oscilant revine la starea iniţială (*fig. 3.1, e*), reluându-se apoi aceeaşi succesiune de fenomene.

Din analiza făcută mai sus rezultă că procesul de încărcare-descărcare a condensatorului este periodic, iar mărimile *q*, *i*, *u* ce caracterizează acest proces sunt oscilatorii. Din *figura 3.1* observăm că dependenţele de timp ale tensiunii *u* şi intensităţii curentului *i* din circuitul oscilant ideal se descriu cu funcţiile „sinus" sau „cosinus", adică sunt funcţii armonice. Aceasta ne permite să afirmăm că în acest circuit, ca şi în cazul pendulului elastic, se produc oscilaţii armonice libere. Aşadar,

> ***circuitul oscilant ideal*** **reprezintă echivalentul electromagnetic al oscilatorului liniar armonic.**

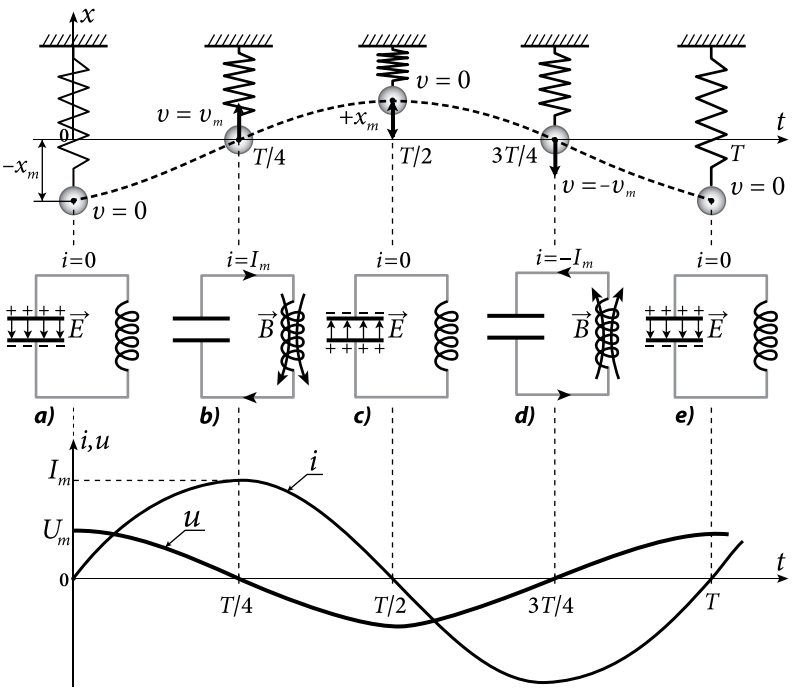



*Fig. 3.1*

## b.* Analogia dintre oscilaţiile mecanice şi electromagnetice. Perioada şi frecvenţa oscilaţiilor electromagnetice

Asemănarea dintre oscilaţiile electromagnetice şi cele mecanice constă în caracterul unic al modului de variaţie a mărimilor ce le caracterizează şi se explică prin analogia condiţiilor ce le provoacă. Revenirea la poziţia de echilibru în cazul pendulului elastic este determinată de forţa de elasticitate $F_x = -kx$ dependentă liniar de deplasarea *x* de la această poziţie. În circuitul oscilant revenirea la starea de echilibru corespunde procesului de descărcare a condensatorului determinat de tensiunea $u = q/C$, dependentă liniar de sarcina *q*.

Aşadar, coeficientului de elasticitate *k*, în cazul oscilaţiilor mecanice, îi corespunde mărimea inversă a capacităţii condensatorului $1/C$ în cazul oscilaţiilor electromagnetice. Precum inerţia corpului de masă *m* a pendulului elastic împiedică creşterea bruscă a vitezei acestuia, curentul electric în circuitul oscilant se măreşte treptat datorită fenomenului de autoinducţie din bobina de inductanţă *L*. Rezultă că inductanţa *L* în cazul oscilaţiilor electromagnetice are acelaşi rol ca şi masa *m* în cazul celor mecanice. Asemenea analogie poate fi stabilită şi pentru alte mărimi fizice. În *tabelul 1* sunt prezentate mărimile fizice mecanice şi electrice, precum şi corespondenţa dintre ele la studiul oscilaţiilor.

*Tabelul 1*

| Oscilaţii mecanice | | Oscilaţii electromagnetice |
|---|---|---|
| Elongaţia $x = A\cos\omega t$ | $\longleftrightarrow$ | Sarcina $q = q_m \cos\omega t$ |
| Viteza $\upsilon = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ | $\longleftrightarrow$ | Intensitatea curentului $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ |
| Acceleraţia $a = \frac{\Delta \upsilon}{\Delta t}$ | $\longleftrightarrow$ | Viteza de variaţie a intensităţii curentului $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ |
| Forţa $F$ | $\longleftrightarrow$ | Tensiunea $U$ |
| Masa $m$ | $\longleftrightarrow$ | Inductanţa $L$ |
| Constanta de elasticitate $k$ | $\longleftrightarrow$ | Mărimea inversă capacităţii $1/C$ |
| Energia potenţială $kx^2/2$ | $\longleftrightarrow$ | Energia câmpului electric $q^2/(2C)$ |
| Energia cinetică $mv^2/2$ | $\longleftrightarrow$ | Energia câmpului magnetic $Li^2/2$ |

Folosind *tabelul 1*, orice relaţie (obţinută la studiul oscilaţiilor mecanice) poate fi scrisă în limbajul oscilaţiilor electromagnetice. De exemplu, relaţia care exprimă legea conservării energiei mecanice în cazul oscilatorului liniar armonic:

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2},$$

pentru circuitul oscilant ideal are aspectul:

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}. \qquad (3.1)$$

Întrucât în circuitul oscilant ideal nu există pierderi de energie, oscilaţiile electromagnetice se produc numai în baza transformărilor energetice reciproce din interiorul lui şi sunt numite **proprii**. Relaţia pentru pulsaţia proprie a acestor oscilaţii se poate demonstra teoretic, însă este mai simplu să folosim *tabelul 1* şi formula $\omega = \sqrt{k/m}$ pentru pulsaţia proprie a pendulului elastic. Aşadar, pentru pulsaţia proprie a oscilaţiilor electromagnetice avem:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \qquad (3.2)$$

iar pentru valorile perioadei şi frecvenţei proprii obţinem:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC} \qquad (3.3)$$

şi

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \qquad (3.4)$$

Relaţia (3.3) a fost demonstrată pentru prima dată în anul 1853 de către fizicianul englez William Thomson (1824–1907) şi este numită **formula lui Thomson**.

Frecvenţa (perioada) proprie a oscilaţiilor din circuitul oscilant depinde numai de parametrii acestuia şi pentru valori mici ale capacităţii şi inductanţei se pot realiza oscilaţii de frecvenţă foarte înaltă.

## c.* Oscilaţii electromagnetice amortizate şi forţate

Studiul circuitului oscilant ideal demonstrează că procesul de transformare a energiei câmpului electric al condensatorului în cea a câmpului magnetic al bobinei şi invers poate continua la nesfârşit. Deoarece elementele circuitului ideal nu posedă rezistenţă, nu există nici pierderi de energie prin efect Joule. De regulă însă, orice circuit oscilant real întotdeauna este caracterizat şi de o anumită rezistenţă. Din această cauză energia acumulată iniţial în condensator se transformă parţial în energia câmpului magnetic şi parţial, datorită efectului termic al curentului, – în energie internă, ce se degajă sub formă de căldură. După fiecare perioadă, sarcina de pe armăturile condensatorului devine mai mică decât în cea precedentă, adică amplitudinea oscilaţiilor electromagnetice se micşorează şi în decursul unui număr oarecare de perioade ele se sting. Astfel de oscilaţii sunt numite **amortizate** (*fig. 3.2*). Prin urmare,

**într-un circuit oscilant real sunt posibile doar *oscilaţii electromagnetice amortizate*.**

Pentru menţinerea procesului oscilatoriu al mărimilor electrice în circuitul oscilant este nevoie să compensăm pierderile de energie prin alimentarea lui la o sursă exterioară. Dacă compensarea se face periodic, atunci în circuit se stabilesc oscilaţii ale curentului şi tensiunii, caracterizate de amplitudine constantă şi frecvenţă egală cu cea a sursei de alimentare. Astfel, periodic se realizează un transfer de energie din exterior spre circuitul oscilant. În asemenea cazuri oscilaţiile sunt numite **oscilaţii electromagnetice forţate**.

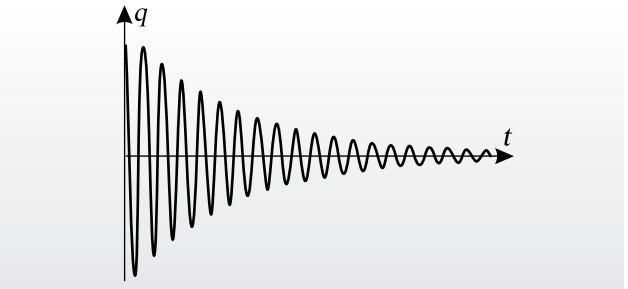



*Fig. 3.2*

## Problemă rezolvată

Intensitatea curentului din circuitul oscilant ideal, alcătuit dintr-o bobină de inductanță $L = 10$ H și un condensator, variază în timp conform legii: $i = 0{,}1 \sin 100\,\pi t$ (A).

Determinați: a) perioada oscilațiilor electromagnetice; b) capacitatea electrică a condensatorului; c) energiile maxime ale câmpurilor electric și magnetic.

**Se dă:**

$L = 10$ H,
$i = 0{,}1 \sin 100\,\pi t$ (A)

*a*) $T$ – ?;
*b*) $C$ – ?;
*c*) $W_{m,E}$ – ?, $W_{m,B}$ – ?

**Rezolvare:**

**a)** Din comparația legii de variație a curentului, dată în condițiile problemei, cu forma generală a legii armonice $i = I_m \sin \omega t$, rezultă $I_m = 0{,}1$ A și $\omega = 2\pi\nu = 100\pi$, deci frecvența $\nu = 50$ Hz. Atunci $T = 1/\nu = 0{,}02$ s.

**b)** Capacitatea electrică a condensatorului se determină ușor din formula lui Thomson (3.3). Avem:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} \approx 10^{-6}\ \text{F} = 1\ \mu\text{F}.$$

**c)** Deoarece circuitul oscilant este ideal, conform legii conservării energiei (3.1), valorile maxime ale energiilor câmpurilor electric și magnetic sunt egale. Într-adevăr,

$$W_{m,E} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{1}{2C} \cdot \frac{I_m^2}{\omega^2} = \frac{I_m^2}{2C} \cdot LC = \frac{LI_m^2}{2} = W_{m,B},$$

iar numeric se obține $W_{m,E} = W_{m,B} = 0{,}05$ J.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce se numește circuit oscilant?
2. Care sunt transformările energetice posibile într-un circuit oscilant și ce reprezintă oscilațiile electromagnetice?
3. În baza cărui fenomen este posibilă reîncărcarea condensatorului din circuitul oscilant? Descrieți procesele care au loc în acest circuit, comparându-le cu cele ce se produc în cazul pendulului elastic.
4.* Care este corespondența dintre mărimile fizice ce descriu oscilațiile mecanice și cele electromagnetice?
5.* Care este formula lui Thomson pentru perioada proprie a oscilațiilor electromagnetice?
6.* Cum se numesc oscilațiile electromagnetice care se produc într-un circuit oscilant real?
7.* Când oscilațiile dintr-un circuit oscilant sunt numite oscilații forțate?
8.* Determinați capacitatea condensatorului dintr-un circuit oscilant ideal, dacă bobina lui are inductanța $L = 10$ mH, iar perioada oscilațiilor electromagnetice este de 4 ms.
9.* Cum și de câte ori se modifică frecvența oscilațiilor electromagnetice dintr-un circuit oscilant, dacă bobina lui este înlocuită cu alta, având inductanța de 16 ori mai mare?
10.* O bobină de inductanță $L = 5$ mH și un condensator plan cu aer, având armăturile de arie $S = 100$ cm$^2$, formează un circuit oscilant. Determinați distanța dintre armăturile condensatorului, dacă perioada oscilațiilor electromagnetice este de 3 μs.

# 3.2.* CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

Analiza fenomenelor electrice și magnetice studiate în capitolele precedente sugerează ideea existenței unei legături între ele. Într-adevăr, conform experiențelor lui Oersted, în jurul oricărui conductor parcurs de curent electric întotdeauna există un câmp magnetic cu linii închise. Totodată, studiul fenomenului de inducție electromagnetică demonstrează că variația inducției câmpului magnetic determină apariția unui câmp electric turbionar, adică tot cu linii închise, datorită căruia apare curentul indus în spirele bobinei.

Generalizând rezultatele experimentale referitoare la fenomenele electrice și magnetice, cunoscute la acel timp, fizicianul englez J.C. Maxwell a elaborat teoria **câmpului electromagnetic** și a **undelor electromagnetice**.

Această teorie are la bază două ipoteze foarte importante. Din legea inducției electromagnetice descoperită experimental de către Faraday rezultă că într-o spiră conductoare curentul indus, apărut în urma variației inducției câmpului magnetic, este determinat de existența unui câmp electric turbionar

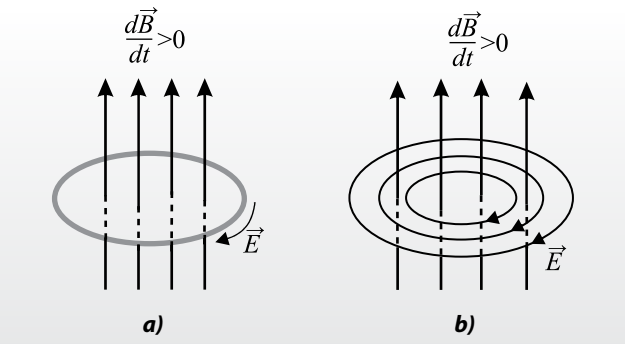



*Fig. 3.3*

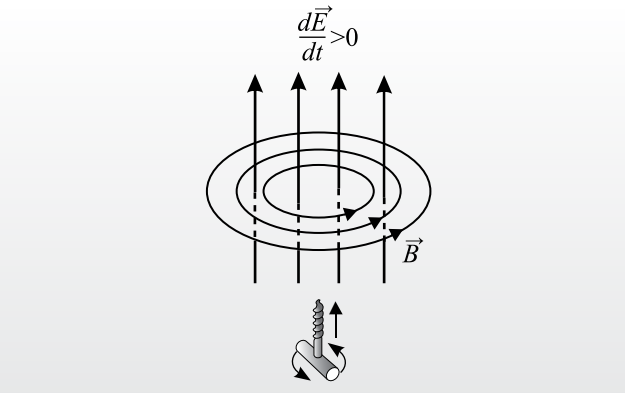



*Fig. 3.4*

JAMES CLERK MAXWELL
(1831–1879)
*fizician englez*

Alături de Newton și Einstein, este considerat unul dintre cei mai de vază fizicieni din toate timpurile. Este cunoscut prin lucrările sale în diferite domenii ale fizicii: electrodinamică, fizică moleculară, fizică statistică, optică, mecanică, teoria elasticității. Se consideră unul dintre fondatorii teoriei cinetico-moleculare a gazelor.
Cele mai importante realizări însă au fost obținute în electrodinamică. În anii 1860–1865 a elaborat teoria câmpului electromagnetic, care conține toate legitățile proceselor electromagnetice. A introdus noțiunea de curent de deplasare și a demonstrat teoretic existența undelor electromagnetice care se propagă în spațiul liber cu viteza luminii. A înaintat ipoteza despre natura electromagnetică a luminii.

(*fig. 3.3, a*). Maxwell generalizează această lege, presupunând apariţia câmpului electric chiar şi în lipsa spirei conductoare (*fig. 3.3, b*), adică a substanţei. Aşadar,

**orice câmp magnetic variabil în timp generează un câmp electric turbionar.**

Intensitatea câmpului electric este cu atât mai mare cu cât variaţia câmpului magnetic este mai rapidă, iar sensul vectorului $\vec{E}$ se determină în baza regulii lui Lenz (*fig. 3.3, b*).

Analizând procesul de încărcare-descărcare a condensatorului din circuitul oscilant, Maxwell înaintează a doua ipoteză:

**orice câmp electric variabil în timp generează un câmp magnetic turbionar.**

Inducţia magnetică a acestui câmp este cu atât mai mare cu cât intensitatea câmpului electric variază mai rapid, iar sensul vectorului $\vec{B}$ este determinat de regula burghiului de dreapta (*fig. 3.4*). Conform acestei ipoteze, într-un circuit de curent alternativ, de exemplu, de încărcare a condensatorului, câmpul magnetic este creat nu numai de conductoarele parcurse de curent, dar şi de câmpul electric variabil dintre armăturile condensatorului. Rezultă că într-o regiune a spaţiului unde se manifestă câmpul electric variabil concomitent există şi câmp magnetic variabil, deoarece aceste câmpuri nu pot fi separate. Generându-se reciproc, ele formează un câmp unic, numit **câmp electromagnetic**.

***Câmpul electromagnetic* reprezintă o formă deosebită de existenţă a materiei. Acesta este caracterizat de vectorii intensităţii câmpului electric $\vec{E}$ şi inducţiei celui magnetic $\vec{B}$, care variază simultan în plane reciproc perpendiculare.**

Câmpurile electric şi magnetic staţionare analizate în capitolele precedente reprezintă, după cum rezultă din teoria lui Maxwell, cazuri particulare ale câmpului electromagnetic unic.

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care sunt ipotezele lui Maxwell? Explicaţi esenţa lor.
2. Cum se determină sensul vectorilor intensităţii câmpului electric şi inducţiei celui magnetic care apar la variaţia câmpului magnetic şi, respectiv, a celui electric?
3. În ce constă interdependenţa câmpurilor electric şi magnetic?
4. Ce reprezintă câmpul electromagnetic?

# 3.3. UNDELE ELECTROMAGNETICE

## a.* Existenţa undelor electromagnetice

Din teoria lui Maxwell despre câmpul electromagnetic şi propagarea lui în spaţiu rezultă câteva proprietăţi importante ale undelor electromagnetice, pe care le formulăm fără a le demonstra:

**Vectorii $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ din unda electromagnetică sunt întotdeauna reciproc perpendiculari:** $\vec{E} \perp \vec{B}$ (*fig. 3.5*). Direcţia şi sensul de propagare a undei electromagnetice sunt determinate de regula burghiului de dreapta. Unda se propagă în sensul înaintării burghiului, atunci când el este rotit de la vectorul $\vec{E}$ spre vectorul $\vec{B}$ (*fig. 3.5*). Chiar dacă sensul vectorilor $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ se modifică continuu, unda electromagnetică are întotdeauna unul şi acelaşi sens de propagare.

**Undele electromagnetice reprezintă unde transversale**. Din *figura 3.5* se observă că vectorii $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ întotdeauna sunt perpendiculari pe direcţia de propagare.

**Viteza de propagare a undelor electromagnetice este finită.** Maxwell a demonstrat că în medii omogene această viteză se determină din relaţia

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}}, \qquad (3.5)$$

unde $\varepsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)\ \frac{\text{F}}{\text{m}}$ şi $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{H}}{\text{m}}$ sunt, respectiv, constantele electrică şi magnetică ale vidului, iar $\varepsilon_r$ şi $\mu_r$ sunt permitivitatea şi permeabilitatea relative ale mediului. Din (3.5) rezultă că în vid unda electromagnetică se propagă cu viteza

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}{4\pi \cdot 10^{-7}}\ \frac{\text{m}^2}{\text{F} \cdot \text{H}}} = 3 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \equiv c. \qquad (3.6)$$

Prin urmare, în vid viteza undei electromagnetice este egală cu viteza luminii. Acest rezultat l-a determinat pe Maxwell să înainteze ipoteza despre natura electromagnetică a luminii.

Din (3.5) şi (3.6) rezultă că viteza de propagare a undei electromagnetice într-un mediu este:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}. \qquad (3.7)$$

**Undele electromagnetice transportă energie.** Această energie se conţine în câmpurile electric şi magnetic ale undei electromagnetice şi este transportată în direcţia şi sensul de propagare al acesteia.

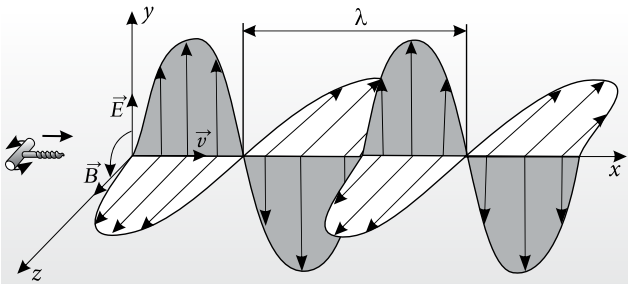



*Fig. 3.5*

## b. Propagarea undelor electromagnetice

Interdependenţa câmpurilor variabile electric şi magnetic determină nu numai existenţa câmpului electromagnetic, dar şi o proprietate fundamentală a acestuia de a se propaga în spaţiu şi timp. Într-adevăr, un câmp electric variabil generează în spaţiul înconjurător un câmp magnetic, de asemenea, variabil. Acesta, la rândul său, produce în regiunea imediat următoare alt câmp electric variabil ş.a.m.d. Aşadar, o perturbaţie a câmpului electromagnetic se propagă în spaţiu din aproape în aproape prin intermediul unui proces oscilatoriu.

**Perturbaţia câmpului electromagnetic ce se propagă în spaţiu se numeşte *undă electromagnetică*.**

**Distanţa la care se propagă unda electromagnetică în timp de o perioadă (*T*), este numită *lungime de undă* (λ).**

Dacă viteza de propagare a undei este $v$, atunci

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}, \qquad (3.8)$$

unde $\nu = 1/T$ este frecvenţa oscilaţiilor. Este important să menţionăm că viteza de propagare a undelor electromagnetice este foarte mare. În aer ea este practic egală cu viteza luminii în vid $c$. În acest caz, lungimea de undă este determinată de relaţia

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \qquad (3.9)$$

Concluzia principală din teoria lui Maxwell despre existenţa undelor electromagnetice a fost confirmată experimental în anul 1888, după aproape zece ani de la moartea lui, de către fizicianul german H. Hertz (1857–1894).

Pentru obţinerea undelor electromagnetice Hertz a folosit dispozitivul inventat de el numit **oscilator**. Acesta constă din două tije, între capetele cărora se produce o descărcare electrică, adică se creează un câmp electric variabil. Se poate considera că oscilatorul lui Hertz este un **circuit oscilant deschis**.

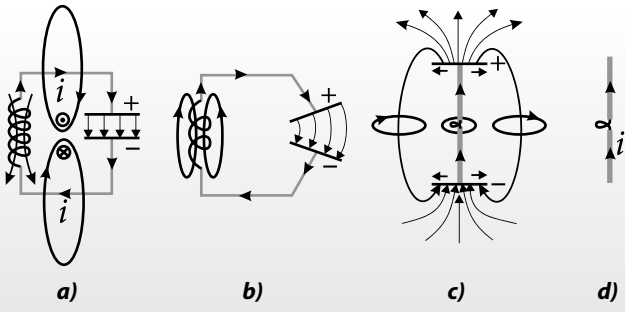



*Fig. 3.6*

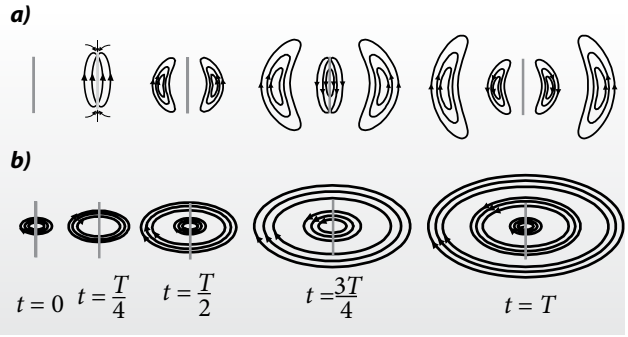



*Fig. 3.7*

Într-adevăr, în circuitul oscilant studiat anterior (*fig. 3.6*, *a*), câmpurile electric și magnetic variabile nu se propagă în spațiu, deoarece sunt practic localizate între armăturile condensatorului și, respectiv, în interiorul bobinei. Mai mult ca atât, în acest circuit curenții prin ramurile lui au sensuri opuse și câmpurile magnetic și electric generate de diferite porțiuni ale circuitului se compensează reciproc. Asemenea circuit mai este numit **circuit oscilant închis**. Dacă însă armăturile condensatorului se îndepărtează una de alta, iar spirele bobinei se întind, atunci liniile de câmp ocupă regiuni tot mai mari ale spațiului, iar porțiunile de circuit în care sensul curentului este opus rămân tot mai puține (*fig. 3.6*, *b, c*). Astfel, se obține circuitul oscilant deschis, numit și **dipol**, care reprezintă un conductor rectiliniu, parcurs de curent doar într-o singură direcție (*fig. 3.6*, *d*).

Pentru excitarea oscilațiilor, Hertz a tăiat conductorul lăsând la mijloc un spațiu mic. La cele două părți ale conductorului se aplică o diferență de potențial înaltă, astfel încât în spațiul mic să apară scânteia de descărcare, datorită căreia în dipol iau naștere oscilații ale curentului electric, deci și unde electromagnetice.

Dipolul folosit pentru emisia în spațiu a undelor electromagnetice de o anumită frecvență sau pentru recepția lor este numit **antenă**.

Procesul de propagare a câmpului electromagnetic de la antena de emisie până la cea de recepție este ilustrat în *figura 3.7*. Liniile de câmp electric (*fig. 3.7*, *a*) și cel magnetic (*fig. 3.7*, *b*) sunt prezentate separat la diferite momente de timp în decursul unei perioade *T*. Evident, configurația liniilor de câmp în unda electromagnetică se obține prin suprapunerea *figurilor 3.7, a* și *b*.

Admitem că la momentul de timp $t = 0$ curentul în dipol este maxim. În jurul lui există un câmp magnetic de inducție maximă. În decursul primului sfert de perioadă intensitatea curentului în dipol se micșorează până la zero, iar variația în timp a câmpului magnetic determină apariția unui câmp electric turbionar. La momentul $t = T/4$ câmpul electric are intensitatea maximă, fiind înconjurat de câmpul magnetic generat de variația lui. După cum se observă și din *figura 3.7*, la acest moment câmpul magnetic se desprinde complet de dipol și începe propagarea sa în spațiu.

În următorul sfert de perioadă intensitatea câmpului electric legat de dipol se micșorează până la zero, concomitent producând un câmp magnetic de inducție crescătoare, dar de sens opus celui inițial. Acesta, la rândul său, generează un câmp electric cu linii închise. Astfel, la momentul $t = T/2$ are loc desprinderea câmpului electric de dipol. În decursul celei de a doua semiperioade procesul descris se repetă, însă câmpurile electric și magnetic au sensuri inversate.

## Verificați-vă cunoștințele

1.* Ce proprietăți ale undelor electromagnetice rezultă din teoria lui Maxwell?
2. Ce se numește undă electromagnetică?
3. Care este relația dintre lungimea de undă, frecvență și viteza de propagare?
4. Ce reprezintă oscilatorul lui Hertz? Cum se obține circuitul oscilant deschis?
5. Cum se explică propagarea undei electromagnetice?
6.* Un circuit oscilant deschis are capacitatea de 5 nF și inductanța de 0,2 mH. Determinați lungimea de undă emisă de acest circuit.

## 3.4. CLASIFICAREA UNDELOR ELECTROMAGNETICE

În baza experienţelor lui Hertz au fost obţinute unde electromagnetice de frecvenţe din ce în ce mai mari şi mai mici. S-a constatat că din punctul de vedere al legilor fizicii nu există nicio restricţie care ar limita valoarea frecvenţei undelor electromagnetice.

Diapazonul undelor electromagnetice este foarte larg, din care cauză este necesară şi o clasificare a lor. Această clasificare se poate face după diferite criterii, însă cea mai uzuală este gruparea radiaţiilor electromagnetice după frecvenţă şi lungimea de undă în vid. Spectrul undelor electromagnetice reprezentat în *figura 3.8* este împărţit convenţional în opt grupe, intervalul de frecvenţe (lungimi de undă) al cărora nu este strict delimitat.

**1. Undele de frecvenţă sonoră.** Sunt undele de cea mai joasă frecvenţă: de la câţiva herţi până la $2 \cdot 10^4$ Hz (cele mai mari lungimi de undă $\lambda \in [1{,}5 \cdot 10^4 \text{ m}; \infty]$). Sursa acestor unde este curentul alternativ de frecvenţe corespunzătoare.

**2. Undele radio.** Intervalul de frecvenţe este cuprins între $2 \cdot 10^4$ Hz şi $10^9$ Hz ($\lambda \in [0{,}3 \text{ m}; 1{,}5 \cdot 10^4 \text{ m}]$). Sursa undelor radio, de asemenea, este curentul alternativ, dar de frecvenţă mai mare, ceea ce face posibilă emisia lor în spaţiul înconjurător, fiind folosite pentru transmiterea informaţiei la distanţe mari (comunicaţii radio şi TV).

**3. Microundele.** Au frecvenţa $\nu \in [10^9 \text{ Hz}; 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}]$ sau lungimea de undă $\lambda \in [1 \text{ mm}; 30 \text{ cm}]$. Sunt generate în circuite electronice speciale şi datorită direcţionării foarte bune cu ajutorul antenelor parabolice se folosesc în comunicaţiile prin satelit şi radar.

**4. Radiaţia infraroşie (IR).** $\nu \in [3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}; 3{,}85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [780 \text{ nm}; 1 \text{ mm}]$). Aceste radiaţii sunt produse de oscilaţiile atomilor şi moleculelor, iar frecvenţa lor depinde de temperatura corpurilor. De aceea radiaţia IR mai este numită deseori şi **radiaţie termică**. Dependenţa intensităţii radiaţiei infraroşii de temperatură face posibilă utilizarea acesteia la măsurarea temperaturii diferitor obiecte. De exemplu, în medicină cu ajutorul unui aparat special (termograf) se pot identifica ţesuturile bolnave, care au o temperatură mai înaltă decât cele sănătoase. Tot cu ajutorul radiaţiei IR se realizează şi dirijarea la distanţă a diferitor aparate electronice (aparate radio, TV, videomagnetofoane ş.a.).

**5. Radiaţia vizibilă.** Ocupă un interval foarte îngust de frecvenţe $\nu \in [3{,}85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}; 7{,}89 \cdot 10^{14} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [380 \text{ nm}; 780 \text{ nm}]$). Acesta este unicul interval al undelor electromagnetice perceput de ochiul uman şi este cel mai important canal de obţinere a informaţiei despre lumea înconjurătoare. Radiaţia vizibilă este emisă în urma tranziţiilor electronilor din învelişul electronic al atomilor. În funcţie de frecvenţa acestor tranziţii, radiaţiile respective sunt percepute ca având diferite culori: roşu (780–620 nm); oranj (620–590 nm); galben (590–560 nm); verde (560–500 nm); albastru (500–480 nm); indigo (480–450 nm); violet (450–380 nm).

**6. Radiaţia ultravioletă (UV).** $\nu \in [8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}; 3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [10 \text{ nm}; 380 \text{ nm}]$). Este produsă prin tranziţiile electronilor din atomi de pe niveluri cu energii mari pe niveluri cu energii mici (de exemplu, la descărcările electrice în gaze). Soarele este o sursă foarte puternică de radiaţii UV, însă ele sunt considerabil absorbite în stratul superior de ozon al atmosferei. Radiaţia UV de intensitate înaltă este extrem de periculoasă pentru organismele vii, cauzând arsuri şi chiar cancerul pielii. Totodată, dozele mici de radiaţie UV acţionează benefic asupra sănătăţii omului prin activizarea anumitor procese din organism şi prin pigmentarea pielii (bronzarea).

**7. Radiaţia X (Röntgen).** $\nu \in [3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}; 3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [1 \text{ pm}; 10 \text{ nm}]$). Este produsă prin frânarea electronilor acceleraţi la tensiuni foarte înalte, care bombardează un metal. Au o capacitate mare de penetrare, de aceea se utilizează la studiul structurii

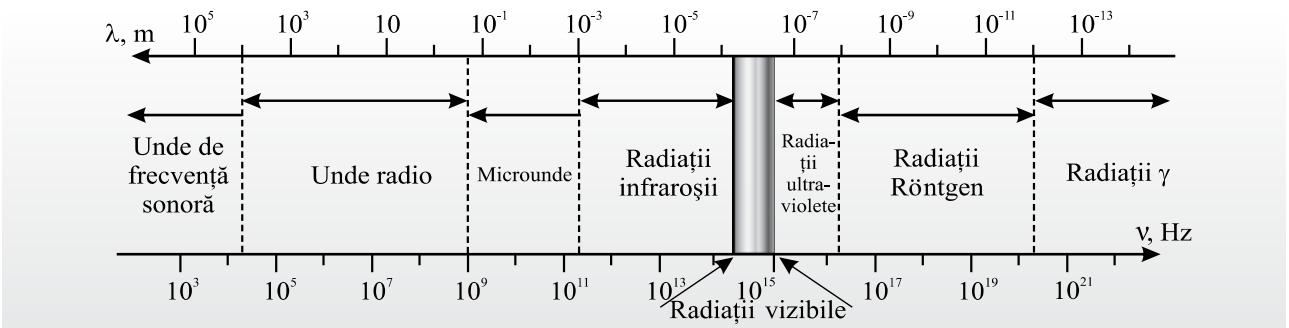



*Fig. 3.8*

reţelelor cristaline, în medicină (radiografia, fluorografia, tratarea anumitor forme de cancer) şi în alte domenii.

**8. Radiaţia γ.** $\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Hz ($\lambda < 1$ pm). Reprezintă radiaţia de cea mai înaltă frecvenţă (cele mai mici lungimi de undă) şi este emisă în procesele de dezintegrare a nucleelor şi în urma reacţiilor nucleare. Radiaţia γ are o capacitate de penetrare şi mai mare decât a radiaţiilor Röntgen fiind, de asemenea, foarte periculoasă.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Numiţi grupele convenţionale în care se împarte spectrul undelor electromagnetice.
2. Care sunt sursele de radiaţie ale undelor de frecvenţă sonoră, radio, ale microundelor şi ale celor infraroşii? Cum sunt utilizate aceste radiaţii?
3. Poate oare omul să audă undele electromagnetice de frecvenţă sonoră?
4. Cum se împarte domeniul radiaţiilor vizibile şi care sunt limitele lungimilor de undă ce corespund anumitor culori?
5. Care sunt sursele radiaţiilor ultraviolete, Röntgen şi γ? Caracterizaţi acţiunea acestora asupra ţesuturilor vii.

## 3.5. COMUNICAŢII PRIN UNDE ELECTROMAGNETICE

Experienţele lui Hertz referitoare la emisia şi recepţia undelor electromagnetice au condus la ideea despre posibilitatea folosirii lor la codificarea şi transmiterea informaţiei. După aproximativ opt ani de la efectuarea acestor experimente cu ajutorul undelor electromagnetice au fost realizate primele comunicaţii la distanţă.

Astfel, în anul 1896, fizicianul şi inginerul italian Guglielmo Marconi (1874–1937) a obţinut brevetul de invenţie pentru metoda de semnalizare la distanţă cu ajutorul emiţătorului şi receptorului radio şi a realizat o comunicare la distanţa de 3 km. Perfecţionând aparatele de emisie–recepţie în anul 1901, el a stabilit prima comunicare fără conductoare de conexiune peste Oceanul Atlantic. Pentru activitatea sa în dezvoltarea tehnicii radio şi pentru propagarea radioului în calitate de mijloc de comunicare, în anul 1909 lui G. Marconi i s-a decernat Premiul Nobel.

În acelaşi timp, independent de Marconi, aparate de emisie–recepţie au fost inventate de fizicianul şi inginerul rus Alexandr Popov (1859–1906). Cu regret însă, prima transmisiune radio la o distanţă de 250 m demonstrată de Popov nu a fost înregistrată documentar, iar afirmaţiile martorilor oculari despre acest eveniment erau contradictorii.

### a. Principiile radiocomunicaţiei

În funcţie de procedeul folosit la codificarea semnalului transmis, se deosebesc câteva tipuri de comunicaţii radio: **radiotelegrafia**, **radiotelefonia** şi **radiodifuziunea**, **televiziunea**, **radiolocaţia**.

Primele aparate de emisie–recepţie funcţionau în regim telegrafic. Codificarea semnalului în acest caz este foarte simplă: emiţătorul, prin conectare şi deconectare, transmite semnale de durată diferită corespunzătoare alfabetului Morse (fiecare literă sau cifră reprezintă o combinaţie de puncte şi liniuţe, adică semnale scurte şi lungi).

Următoarea etapă în dezvoltarea radiocomunicaţiei a fost transmiterea semnalelor audio (radiotelefonia şi radiodifuziunea) şi video (televiziunea). Întrucât aceste semnale reprezintă oscilaţii de frecvenţă joasă, iar puterea de emisie a undelor electromagnetice depinde de frecvenţă, ele practic nu se propagă. De aceea este nevoie de un semnal de frecvenţă înaltă (din domeniul undelor radio), numit **semnal purtător**, care se compune cu cel de frecvenţă joasă ce trebuie transmis. Acest proces este numit **modulare** şi reprezintă modificarea codificată a unuia din parametrii semnalului purtător.

Cele mai simple tipuri de modulare sunt: **modularea în amplitudine** (**AM** – din limba engleză *amplitude modulation*) şi **modularea în frecvenţă** (**FM** – *frequency modulation*). Ele reprezintă modificarea codificată a amplitudinii şi, respectiv, a frecvenţei semnalului purtător în funcţie de legea de variaţie a celui transmis. În *figura 3.9* sunt reprezentate semnalele: purtător (*a*); de frecvenţă sonoră (*b*); AM (*c*) şi FM (*d*). Principiile de transmitere atât a semnalelor audio, cât şi a celor video sunt aceleaşi. Diferă doar dispozitivele electronice de transformare a acestor semnale în oscilaţii electrice de frecvenţă joasă.

Pentru recepţionarea informaţiei transmise de emiţător, aceasta trebuie mai întâi decodificată, adică este nevoie de extragerea semnalului sonor din cel modulat.

**Procesul de separare a oscilaţiilor de frecvenţă joasă din oscilaţiile modulate de frecvenţă înaltă se numeşte *demodulare* sau *detectare*, iar dispozitivul ce realizează acest proces – *demodulator* sau *detector*.**

Radioreceptoarele contemporane sunt construite după acelaşi principiu, însă pentru recepţionarea unui număr mai mare de staţii cu o calitate mai înaltă a sunetului, ele sunt înzestrate cu diferite amplificatoare.

În funcţie de particularităţile circuitelor electronice folosite pentru emisie–recepţie şi ale propagării undelor radio, ele se împart convenţional în câteva benzi: unde **lungi** ($\lambda > 1$ km); **medii** ($100\ \text{m} < \lambda < 1$ km); **scurte** ($10\ \text{m} < \lambda < 100\ \text{m}$) şi **ultrascurte** ($\lambda < 10$ m).

## b. Radiolocaţia

Proprietatea de reflexie a undelor electromagnetice este folosită pe larg la determinarea existenţei şi poziţiei în spaţiu a diferitor obiecte.

**Localizarea în spaţiu a unui obiect cu ajutorul undelor electromagnetice se numeşte *radiolocaţie*, iar dispozitivul electronic folosit în acest scop – *radar* sau *radiolocator*.**

Orice dispozitiv de tip radar constă dintr-un emiţător de unde electromagnetice, un receptor al acestora şi o antenă direcţională. Emiţătorul emite în spaţiu grupuri de unde separate prin pauze şi concentrate în fascicule cât mai înguste. De aceea antena de emisie este aşezată în focarul unei oglinzi metalice concave, care asigură propagarea undei electromagnetice într-o singură direcţie. În timpul pauzelor dispozitivul radar este trecut la funcţionarea în regim de recepţie, înregistrând undele reflectate de obiectul întâlnit eventual în calea lor. Cunoscând intervalul de timp $t$ de la momentul trimiterii semnalului până la momentul recepţionării celui reflectat şi viteza de propagare a undei electromagnetice egală cu cea de propagare a luminii în vid $c$, se determină uşor distanţa $d$ până la obiect. Deoarece semnalul emis şi cel recepţionat parcurg drumul de la staţia radar până la obiect şi înapoi până la staţie, rezultă $2d = ct$, de unde obţinem:

$$d = \frac{ct}{2}.$$

Întrucât undele electromagnetice de frecvenţe mari pot fi uşor direcţionate şi, în acelaşi timp, fiind bine reflectate şi de obiectele mici, în radiolocaţie se folosesc cu precădere undele ultrascurte $\nu \in \left[10^8; 10^{11}\right]$ Hz.

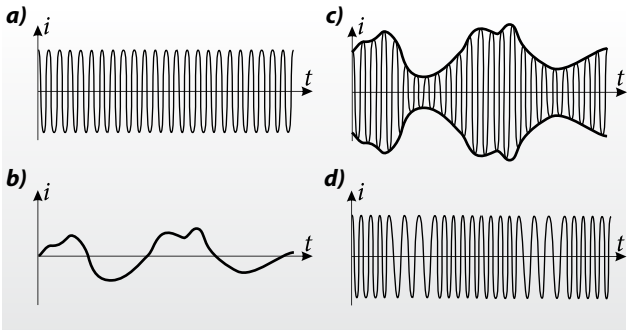



*Fig. 3.9*

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

Elementul principal al oricărui demodulator este dioda semiconductoare sau alt element de conducţie unilaterală (dioda cu vid sau trioda). Să analizăm funcţionarea demodulatorului în baza celui mai simplu radioreceptor, a cărui schemă electrică de principiu este reprezentată în *figura 3.10, a*. Semnalul de frecvenţă înaltă modulat în amplitudine (*fig. 3.9, c*) este captat de antena de recepţie cu ajutorul circuitului oscilant *LC* acordat în regim de rezonanţă la frecvenţa purtătoare a staţiei de emisie. La trecerea semnalului recepţionat prin dioda *D* are loc redresarea lui, obţinându-se un curent alcătuit doar din pulsaţii pozitive (*fig. 3.10, b*). Aceste pulsaţii sunt însă tot de înaltă frecvenţă şi de aceea următoarea etapă în realizarea demodulării este ondularea sau netezirea lor cu ajutorul unui filtru. Cel mai simplu filtru este condensatorul conectat în paralel cu sarcina inductivă (căştile audio). În intervalele de timp când dioda este deschisă impulsurile de curent se ramifică, astfel încât tensiunea la bornele condensatorului $C_1$ şi ale căştilor audio este aceeaşi ($i_1X_L = i_2X_C$ sau $i_1\omega L = i_2/\omega C_1$). Rezultă că prin condensator circulă un curent de frecvenţă înaltă, iar prin căşti – de frecvenţă joasă. Ramificarea curentului în $i_1$ şi $i_2$ conduce, pe de o parte, la micşorarea intensităţii lui prin căştile audio, însă pe de altă parte, în intervalele de timp dintre impulsuri, când dioda este blocată, condensatorul se descarcă dând naştere unui curent $i_3$ ce trece prin căşti în acelaşi sens cu $i_1$ (*fig. 3.10, a*). Astfel, prin căştile audio trece un curent de frecvenţă sonoră, ale cărui oscilaţii au forma aproape identică cu cea a semnalului de frecvenţă joasă transmis de emiţător (*fig. 3.10, c*). Întrucât în căştile audio sunetul provine de la vibraţiile membranelor care oscilează cu frecvenţa curentului ce trece prin bobinele lor, pulsaţiile mici rămase după filtru practic nu influenţează asupra auzului.

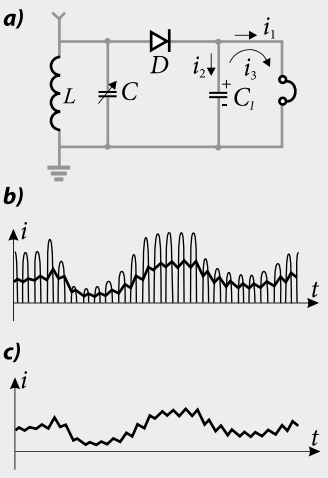



*Fig. 3.10*

Pentru a mări câmpul de observaţie a staţiei radar, antena ei se roteşte atât în plan orizontal, cât şi în cel vertical. Raza de acţiune a staţiilor radar este de ordinul sutelor de kilometri.

Odată cu perfecţionarea dispozitivelor radar, aria de utilizare a lor devine tot mai variată. Cu ajutorul radarelor moderne se poate determina viteza, dimensiunile şi forma obiectelor. Radarul este folosit în navigaţie la stabilirea poziţiei şi vitezei navelor maritime şi aeronavelor, în aeroporturi la dirijarea decolării şi aterizării avioanelor în condiţii de vizibilitate redusă, în securitatea rutieră la verificarea vitezei automobilelor. Navele maritime şi aeronavele, de asemenea, sunt înzestrate cu dispozitive radar pentru asigurarea securităţii de navigaţie.

Radarele se folosesc pe larg şi în meteorologie. Cu ajutorul lor se obţin informaţii atât despre poziţia maselor de nori, cât şi despre viteza acestora, ceea ce este foarte important pentru precizarea prognozelor meteo.

Un capitol aparte în dezvoltarea radiolocaţiei îl constituie extinderea în astronomie. **Radioastronomia** studiază corpurile cereşti cu ajutorul undelor radio şi milimetrice emise de acestea, folosind receptori de tip radar. Astfel, au fost localizate corpuri cereşti aflate la distanţe inaccesibile pentru telescoapele optice. Instalaţiile moderne folosite în acest scop sunt numite **radiotelescoape**. Informaţiile obţinute cu ajutorul lor oferă posibilităţi excepţionale pentru studiul structurii şi evoluţiei Universului.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care sunt tipurile de comunicaţii radio? Ce reprezintă radiotelegrafia?
2. În ce constă procesul de modulare a semnalelor şi care este deosebirea dintre modulările AM şi FM?
3. Ce se numeşte demodulare şi cum se realizează acest proces?
4. Ce se numeşte radiolocaţie şi ce reprezintă radarul?
5. Cum se determină distanţa până la un obiect cu ajutorul radarului?
6. Unde sunt folosite radarele? Ce reprezintă radioastronomia?

## 3.6. EVOLUŢIA CONCEPŢIILOR DESPRE NATURA LUMINII

Primele concepţii despre natura luminii au apărut în Antichitate. În secolul VI î.Hr., Pitagora şi discipolii săi considerau că din ochii omului porneşte o emanaţie invizibilă care „pipăie” obiectul cercetat, astfel acesta fiind văzut. Democrit (sec. IV î.Hr.) însă considera că senzaţia vizuală este determinată de acţiunea atomilor emişi de corpurile luminoase care nimeresc pe retina ochiului. Aristotel, în sec. IV î.Hr., susţinea că lumina reprezintă nişte raze, numite „raze vizuale”, care ies din ochi. Abia spre sfârşitul sec. al XVII-lea s-au conturat două concepţii referitoare la natura luminii, determinate, în mare măsură, de realizările în studiul legilor mecanicii: ***corpusculară***, elaborată de către Newton, şi ***ondulatorie***, formulată de către fizicianul olandez C. Huygens (1629–1695).

Concepţia corpusculară are la bază proprietatea de propagare rectilinie a luminii în mediile omogene, stabilită experimental. Potrivit acesteia, ***lumina*** **reprezintă un flux de particule (corpusculi de lumină), emise sau reflectate de corpuri care se propagă de-a lungul unor linii drepte cu o viteză enormă conform legilor mecanicii clasice**. Se presupunea că există corpusculi de lumină de dimensiuni şi mase diferite. Cei mai mari erau atribuiţi luminii de culoare roşu-închis, iar cei mai mici – luminii de culoare violetă. Lumina solară era considerată de către Newton un amestec de corpusculi diferiţi. La interfaţa dintre două medii diverse corpusculii se refractau cu atât mai mult, cu cât masa şi dimensiunile lor erau mai mici.

Teoria despre natura ondulatorie a luminii a fost emisă de fizicianul olandez Huygens, contemporanul lui Newton, potrivit căruia, ***lumina*** **reprezintă un proces ondulatoriu, ce se desfăşoară într-un mediu ipotetic elastic, numit *eter*, care umple tot spaţiul şi pătrunde în interiorul tuturor corpurilor**. Deşi Huygens trata lumina drept o undă luminoasă, nu a observat caracterul de periodicitate a acesteia şi nu a ţinut seama de *lungimea de undă*, considerând că lumina se propagă rectiliniu chiar şi la trecerea prin orificii foarte mici, adică nu a luat în seamă fenomenul de difracţie.

Succesele remarcabile obţinute în mecanică au determinat conţinutul mecanicist al celor două concepţii asupra naturii luminii. Deşi ambele teorii erau contradictorii, niciuna dintre ele nu o excludea pe cealaltă şi, doar datorită autorităţii enorme a lui Newton în lumea ştiinţifică, s-a dat prioritate teoriei corpusculare, care a persistat pe parcursul secolului XVIII.

La începutul secolului al XIX-lea s-a intensificat disputa referitoare la concepţiile corpusculară şi ondulatorie. Cercetările efectuate de Th. Young (1773–1829) şi A. Fresnel (1788–1827) au exclus definitiv concepţia corpusculară, punând bazele ***opticii ondulatorii***.

În a doua jumătate a secolului al XIX-lea, ilustrul fizician englez James Clerk Maxwell a demonstrat teoretic existenţa undelor electromagnetice şi a formulat o concluzie foarte importantă:

**Lumina are natură electromagnetică, adică se propagă în spaţiu sub forma de unde electromagnetice.**

Conform teoriei electromagnetice, undele de lumină sunt unde electromagnetice cu lungimi de undă (frecvenţe) cuprinse într-un domeniu foarte îngust – de la $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ m ($4 \cdot 10^{14}$ Hz) pentru lumina roşie până la $3{,}9 \cdot 10^{-7}$ m ($7{,}7 \cdot 10^{14}$ Hz) pentru lumina violetă –, numit domeniu ***vizibil***. Într-o accepţie mai vastă optica studiază şi radiaţiile electromagnetice cu lungimi de undă (frecvenţe) învecinate domeniului vizibil. Radiaţiile cuprinse aproximativ între $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ m ($4 \cdot 10^{14}$ Hz) şi $10^{-3}$ m ($3 \cdot 10^{11}$ Hz) constituie domeniul ***infraroşu***, iar între $3{,}9 \cdot 10^{-7}$ m ($7{,}7 \cdot 10^{14}$ Hz) şi $6 \cdot 10^{-10}$ m ($5 \cdot 10^{17}$ Hz) – domeniul ***ultraviolet***.

Teoria electromagnetică a luminii, elaborată de Maxwell, a fost confirmată experimental de fizicianul german H. Hertz în anii 1887–1888, care a demonstrat existenţa undelor electromagnetice. De asemenea, au fost confirmate şi alte concluzii, ce rezultă din teoria lui Maxwell. De exemplu, fizicianul rus Piotr Lebedev în anul 1899 a demonstrat experimental existenţa presiunii exercitate de lumină asupra corpurilor pe care cade.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Ce concepţii aveau grecii antici despre natura luminii?
2. Ce reprezintă lumina conform concepţiei lui Newton?
3. Cum este tratată lumina după concepţia ondulatorie a lui Huygens?
4. Ce concluzie a formulat Maxwell despre natura luminii?
5. Care sunt intervalele lungimilor de undă şi ale frecvenţelor în domeniile vizibil, infraroşu şi ultraviolet?
6. Ce experimente au confirmat teoria electromagnetică a lui Maxwell?

## 3.7. INTERFERENŢA LUMINII

### Să ne amintim

La propagarea luminii sub formă de unde electromagnetice, în anumite condiţii, la suprapunerea lor se produc fenomene specifice mişcării ondulatorii, asemenea interferenţei şi difracţiei undelor elastice (studiate în clasa a X-a).

Să analizăm fenomenul de interferenţă a luminii, aducându-ne aminte, mai întâi, condiţiile în care se produce acesta în cazul undelor mecanice.

**Undele caracterizate de aceeaşi frecvenţă şi diferenţa de fază constantă în timp sunt numite *unde coerente*.**

La suprapunerea undelor coerente, energia lor se redistribuie, rezultând formarea unor maxime şi minime ale amplitudinii undelor. Dacă diferenţa de drum $\Delta x$ parcursă de cele două unde până la suprapunerea lor este un număr par de semilungimi de undă $\lambda$:

$$\Delta x = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}, \qquad (3.10)$$

unde $m = 0, 1, 2, \ldots$, atunci în punctul de suprapunere undele sunt în fază şi se obţine maxim de interferenţă, iar dacă

$$\Delta x = \pm (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \qquad (3.11)$$

undele sunt în opoziţie de fază şi avem minim de interferenţă. Numărul întreg $m$ este ordinul maximului sau minimului de interferenţă.

## a. Coerenţa undelor luminoase. Condiţiile de observare a interferenţei luminii

Datorită frecvenţelor joase ale undelor mecanice, întotdeauna se pot construi două surse identice de unde, condiţia de coerenţă a lor fiind realizată relativ simplu. Satisfacerea aceleiaşi condiţii în cazul undelor de lumină este mult mai complicată.

Pentru a înţelege cum se obţin undele coerente de lumină, vom analiza procesul de emisie a ei. Sursele de lumină, chiar şi punctiforme, sunt constituite dintr-un număr foarte mare de atomi. Unii din ei, primind energie din exterior, au surplus de energie. Starea respectivă a atomului este numită **excitată** şi este nestabilă. La un moment el emite o undă specifică, numită **tren de unde**. Procesul de emisie a luminii, în urma căruia atomul se transferă în starea cu energie minimă, numită **stare fundamentală**, durează aproximativ $10^{-8}$ s. Ulterior alt atom excitat emite alt tren de unde, dar cu altă fază ş.a.m.d. Atomii din starea fundamentală, primind energie, de exemplu de la o sursă de curent electric, se excită din nou şi reiau procesul de emisie a undelor luminoase. Într-un punct oarecare al mediului fazele undelor luminoase provenite de la diferiţi atomi sunt diverse. Aceeaşi proprietate vor poseda şi undele sosite în punctul dat de la altă sursă. Atunci diferenţa de fază a undelor se va modifica continuu, deci undele nu vor fi coerente. Astfel, se explică imposibilitatea obţinerii fenomenului de interferenţă de la două surse de lumină, fie chiar şi identice. Din cele expuse rezultă:

undele de lumină pot fi coerente numai dacă provin de la aceiaşi atomi ce aparţin unei singure surse.

Pentru a realiza această condiţie, trenurile de unde, provenite de la un grup de atomi, se divizează în două fascicule, care, parcurgând drumuri diferite până la un punct oarecare, se suprapun, fiind caracterizate de o anumită diferenţă de fază. În alt moment, când în punctul de suprapunere ajung fasciculele obţinute prin divizarea altor trenuri de unde, fazele lor vor fi altele, însă diferenţa de fază nu se modifică, deoarece ea depinde de valoarea diferenţei de drum, care rămâne aceeaşi. Astfel, se poate menţine o diferenţă de fază constantă în timp. Pentru aceasta însă trebuie realizată încă o condiţie: timpul, numit **timp de coerenţă** $\tau_c$, în care trenul de unde parcurge diferenţa de drum, trebuie să fie mai mic decât durata de emisie a acestuia, adică $\tau_c \leq 10^{-8}$ s. În caz contrar, în punctul cercetat se vor suprapune unde ce aparţin diferitor trenuri de unde şi diferenţa de fază nu va mai fi constantă în timp. Deşi timpul de coerenţă este foarte mic, această condiţie se realizează datorită vitezei foarte mari de propagare a luminii şi diferenţelor de drum, de regulă, mici. În timpul de coerenţă $\tau_c$ trenul de unde se propagă la o distanţă $l_c \approx c \cdot \tau_c \approx 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} \approx 3\,\text{m}$, numită **distanţă de coerenţă**. Rezultă că interferenţa undelor luminoase se realizează atunci când diferenţa lor de drum este mai mică decât distanţa de coerenţă.

Condiţiile (3.10) şi (3.11) de formare a maximelor şi, respectiv, a minimelor de interferenţă a undelor mecanice sunt valabile şi în cazul undelor de lumină. Viteza luminii într-un mediu este de $n$ ori mai mică decât în vid ($n$ este indicele de refracţie al mediului). Ca rezultat, în timpul în care lumina parcurge într-un mediu distanţa $x$, în vid ea parcurge o distanţă de $n$ ori mai mare.

**Produsul dintre distanţa *x* parcursă de unda luminoasă printr-un mediu transparent (*drumul geometric*) şi indicele de refracţie *n* al acestuia se numeşte *drum optic*:**

$$L = nx.$$

Se observă că în vid, unde $n = 1$, drumul optic coincide cu cel geometric. În medii transparente, condiţiile de formare a maximelor şi minimelor de interferenţă a undelor de lumină la fel sunt determinate de relaţiile (3.10) şi (3.11), însă ***diferenţa de drum* $\Delta x$ *se înlocuieşte cu diferenţa de drum optic* $\Delta$**. Aşadar, condiţia de formare a maximelor de interferenţă a luminii este:

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}, \qquad (3.12)$$

iar a minimelor:

$$\Delta = \pm (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \qquad (3.13)$$

În aceste expresii, numărul întreg $m$ este numit **ordin** al maximelor sau minimelor de interferenţă, $\lambda$ este lungimea de undă a luminii utilizate, iar diferenţa de drum optic se calculează din relaţia:

$$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 x_2 - n_1 x_1. \qquad (3.14)$$

Despre două medii cu indicii de refracţie $n_1$ şi $n_2 > n_1$ se spune că primul este ***mai puţin dens din punct de vedere optic***, iar al doilea – ***mai dens din punct de vedere optic***.

Fenomenul de interferenţă a luminii a fost observat încă în timpul lui Newton, însă explicaţia corectă a acestuia a făcut-o Thomas Young (1773–1829) în anul 1802. Înţelegerea mecanismului de formare a undelor coerente a permis construirea mai multor dispozitive interferenţiale, principalele dintre care vor fi descrise în continuare.

## b.* Dispozitivul lui Young

Schema instalaţiei, folosită de Young pentru obţinerea undelor de lumină coerente şi a interferenţei lor, este reprezentată în *figura 3.11, a*. Un flux puternic de lumină, provenit de la sursa $S_l$, nimereşte pe un filtru *F*, care permite trecerea luminii de o anumită frecvenţă, adică ***monocromatică***, şi ajunge la ecranul $E_1$, prevăzut cu o fantă de dimensiuni mici *S*. De la sursa *S* se propagă unde sferice, frontul de undă al cărora ajunge la ecranul $E_2$, prevăzut cu două fante $S_1$ şi $S_2$ de dimensiuni cât mai mici, dispuse la distanţă mică una de alta şi simetric faţă de fanta *S*. Fantele $S_1$ şi $S_2$ sunt şi ele surse de unde secundare, dar de aceleaşi frecvenţă şi fază, adică coerente. Undele coerente de la sursele $S_1$ şi $S_2$ se propagă mai departe şi în punctele de suprapunere se vor obţine maxime sau minime de interferenţă, care se pot vedea pe ecranul $E_3$ amplasat paralel cu ecranul $E_2$. Câmpul de interferenţă reprezintă un şir de franje alternativ luminoase şi întunecate, cele luminoase având aceeaşi culoare ca lumina monocromatică utilizată (*fig. I,* planşa color, p. 162). Câmpul de interferenţă se remarcă în orice regiune a spaţiului de după ecranul $E_2$ unde se suprapun undele coerente. De aceea se spune că are loc ***interferenţa cu franje nelocalizate în spaţiu***.

Pentru determinarea poziţiei franjelor luminoase şi întunecate de pe ecranul $E_3$, vom analiza o schemă simplificată a instalaţiei lui Young, prezentată în *figura 3.11, b*. La distanţa $D >> d$ se plasează un ecran, mijlocul căruia *O* se află pe aceeaşi dreaptă cu mijlocul *O′* al distanţei *d* dintre sursele de lumină. Astfel, tabloul de interferenţă se va obţine simetric de o parte şi de alta a punctului *O*, care coincide cu originea axei *Oy* de-a lungul ecranului paralel cu planul surselor. În *figura 3.11, b* este reprezentată şi dependenţa intensităţii luminii (energia luminoasă) *I* pe ecran de distanţa *y* de la centrul lui.

Rezultatul interferenţei în punctul *P*(*P′*) depinde de diferenţa de drum $\Delta = L_2 - L_1 = S_2M$ (*fig. 3.11, b*). Din $\Delta S_1MS_2$ şi $\Delta O'OP$ avem, respectiv, $\sin\alpha = \Delta/d$ şi $\mathrm{tg}\alpha = y_m/D$, unde $y_m$ este coordonata punctului *P*. Întrucât $D >> d$, unghiul $\alpha$ este mic şi $\sin\alpha \approx \mathrm{tg}\,\alpha$. Rezultă că $\frac{\Delta}{d} = \frac{y_m}{D}$, de unde:

$$\Delta = \frac{y_m d}{D} \quad \text{sau} \quad y_m = \frac{D}{d}\Delta. \tag{3.15}$$

Dacă în punctul *P*(*P′*) se realizează condiţia unui maxim de interferenţă, atunci substituind (3.12) în (3.15), se obţine valoarea coordonatei lui:

$$y_m^{\max} = \pm\frac{mD\lambda}{d}, \tag{3.16}$$

iar dacă se satisface condiţia unui minim, atunci din (3.13) şi (3.15) avem:

$$y_m^{\min} = \pm(2m+1)\frac{D\lambda}{2d}. \tag{3.17}$$

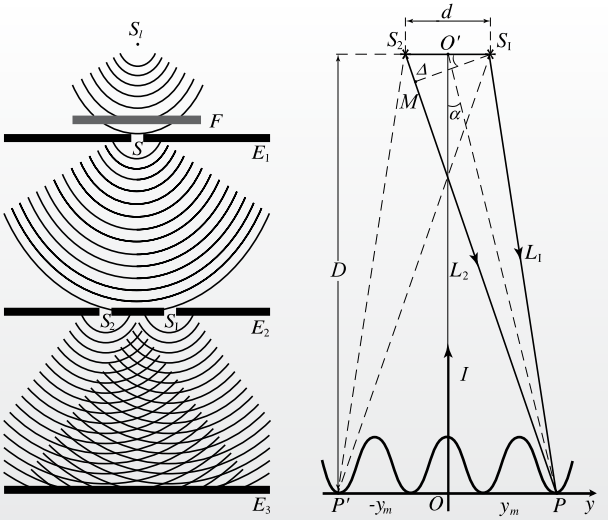



*Fig. 3.11*

Din (3.16) și (3.17) se observă că pentru $m = 0$ se formează un maxim în punctul $O$, numit **maxim central**, și două minime, dispuse simetric de o parte și de alta al acestuia. Pentru $m = 1$ se formează două maxime, numite **maxime de ordinul 1** și două minime simetrice față de același punct, pentru $m = 2$ – două **maxime de ordinul 2** ș.a.m.d. Aceste maxime și minime reprezintă **franjele de interferență**, respectiv, luminoase și întunecate (vezi *fig. I,* planșa color, p. 162).

**Mărimea ($i$) egală cu distanța dintre două franje luminoase sau întunecate consecutive se numește *interfranjă*:**

$$i = y_{m+1}^{\max} - y_m^{\max} = \frac{D\lambda}{d}. \qquad (3.18)$$

Conform acestei relații, interfranja nu depinde de ordinul maximelor și pentru o anumită lungime de undă dată ea este cu atât mai mare, cu cât distanța $d$ dintre sursele $S_1$ și $S_2$ este mai mică, iar distanța $D$ mai mare. Faptul că $i$ nu depinde de $m$ înseamnă că franjele sunt echidistante (*fig. I,* planșa color, p. 162).

Cunoașterea valorii interfranjei permite determinarea lungimii de undă a luminii. Din (3.18) avem:

$$\lambda = \frac{d}{D} i. \qquad (3.19)$$

Cu ajutorul dispozitivului lui Young se poate studia și interferența luminii albe, adică compuse (pentru aceasta se înlătură filtrul de lumină $F$ (*fig. 3.11, a*)). Deoarece coordonata maximelor (3.16) este direct proporțională cu lungimea de undă, maximele ce corespund diferitor radiații monocromatice nu se vor suprapune, ci vor fi dispuse unul lângă altul în ordinea crescătoare a lungimilor de undă. Franjele luminoase din tabloul de interferență, cu excepția celei centrale, vor apărea colorate, sub formă de **spectre de interferență**. Franja centrală se obține pentru $m = 0$, într-un loc în care se compun toate radiațiile componente ale luminii albe și, ca rezultat, se obține, de asemenea, lumină albă. Culorile spectrului de interferență sunt dispuse în ordinea crescătoare a lungimilor de undă, de la violet spre roșu. La creșterea ordinului maximelor culorile corespunzătoare diferitor lungimi de undă se suprapun.

## c.* Lama cu fețe plan-paralele

Fenomenul de interferență a luminii apare și la reflexia și refracția parțială a razelor de lumină incidente pe straturi subțiri transparente. În urma reflexiei, pe ambele suprafețe ale stratului, se formează unde provenite de la aceeași sursă, adică coerente, care interferează. Asemenea situații se realizează atât în straturi de grosime constantă, cât și variabilă.

Se consideră o lamă transparentă subțire cu suprafețe plan-paralele de grosime $d$ și indice de refracție $n$ (*fig. 3.12, a*). O undă plană de lumină monocromatică, reprezentată prin raza *1* incidentă pe fața superioară sub un unghi $i$, parțial se reflectă (raza *1′*) și se refractă. Raza refractată ajunge la fața inferioară, unde iarăși parțial se refractă (raza *1″*) și se reflectă ș.a.m.d. În urma reflexiilor și refracțiilor repetate pe cele două suprafețe ale lamei se obțin razele paralele *1′*, *2′*, ce se propagă de la fața superioară, și *1″*, *2″* – de la cea inferioară. Alte raze, obținute în urma reflexiilor și refracțiilor repetate, vor avea o intensitate mult mai mică din cauza pierderilor și pot fi neglijate. Chiar și razele *1″*, *2″* sunt de intensitate mult mai redusă decât *1′*, *2′* și se observă numai pentru grosimi foarte mici ale lamei. Razele menționate sunt coerente, deoarece provin de la aceeași sursă, parcurg distanțe diferite și posedă diferență de drum optic. Cu alte cuvinte, ele întrunesc condițiile necesare pentru interferență, dar tabloul respectiv nu se observă, întrucât razele sunt paralele. Acesta însă poate fi localizat cu ajutorul unei lentile convergente, amplasând ecranul în planul focal al lentilei (*fig. 3.12, a*). În asemenea situații are loc **interferența cu franje localizate în spațiu**.

Rezultatul interferenței într-un punct oarecare al ecranului depinde de valoarea diferenței de drum optic al razelor care se suprapun. Vom calcula diferența de drum optic într-un caz simplu, când unda de lumină este incidentă normal pe suprafața lamei. Din *figura 3.12, b* rezultă că

$$\Delta = (AB + BA) \cdot n - \left(-\frac{\lambda}{2}\right) = 2dn + \frac{\lambda}{2}. \qquad (3.20)$$

Termenul λ/2 este introdus datorită reflexiei razei *1′* de la un mediu mai dens din punct de vedere optic. În acest caz raza reflectată este în opoziţie de fază cu cea incidentă, ceea ce corespunde unei micşorări a drumului optic al acesteia cu o semilungime de undă.

Dacă lumina este incidentă pe lama subţire sub un unghi *i* (*fig. 3.12, a*), atunci pentru diferenţa de drum optic se poate obţine relaţia

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}, \qquad (3.21)$$

care pentru $i = 0$ trece în (3.20).

Astfel, pe ecranul *E* (*fig. 3.12, a*) se obţin franje luminoase când se realizează condiţia:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \pm 2m\frac{\lambda}{2}, \qquad (3.22)$$

iar franje întunecate când:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (3.23)$$

Întrucât pentru fiecare unghi de incidenţă, adică pentru o anumită înclinare a razelor incidente, se obţine propriul tablou de interferenţă, franjele acestuia sunt numite **franje de egală înclinare**.

Dacă lama cu feţe plan-paralele este iluminată cu lumină albă (compusă dintr-o serie de lungimi de undă din întreg diapazonul vizibil), atunci pentru un anumit unghi de incidenţă diferenţa de drum optic (3.21) îndeplineşte condiţia de maxim (3.22) numai pentru o singură valoare a lungimii de undă. Cu alte cuvinte, pentru observator lama pare de o anumită culoare, iar dacă se modifică unghiul de incidenţă, condiţia de maxim se realizează pentru altă valoare a lungimii de undă şi lama pare colorată altfel.

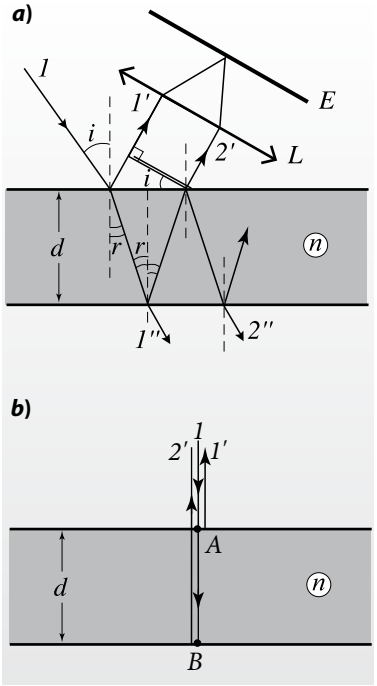



*Fig. 3.12*

## d.* Inelele lui Newton

Primele cercetări experimentale ale interferenţei luminii au fost realizate de către Newton folosind dispozitivul, schema căruia este prezentată în *figura 3.13*. El este alcătuit dintr-o lentilă plan-convexă, aşezată cu convexitatea pe suprafaţa plană a unei lame de sticlă. Dacă raza de curbură *R* a lentilei este mare, atunci între ea şi lamă se formează un strat de aer de grosime variabilă numit şi **pană optică** de aer. La iluminarea dispozitivului cu un flux de raze paralele de lumină monocromatică, incidente normal pe suprafaţa plană a lentilei, interferenţa se obţine la suprapunerea razelor reflectate pe suprafeţele de separaţie superioară şi inferioară ale stratului de aer de grosime variabilă cu sticla. Deoarece punctele, cărora le corespunde aceeaşi grosime a penei optice de aer, sunt situate pe cercuri concentrice cu centrul în punctul de contact *C* al lentilei cu lama de sticlă (*fig. 3.13*), franjele luminoase şi întunecate au forma unor inele, numite **inelele lui Newton**.

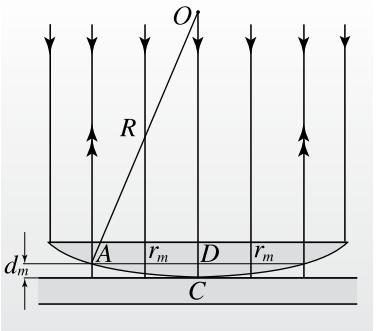



*Fig. 3.13*

Razele inelelor lui Newton obţinute în lumina reflectată se determină uşor din *figura 3.13*. Presupunem că inelul cu numărul *m* se formează în

punctele aflate la distanţa $r_m$ de punctul *C*, unde grosimea penei de aer este $d_m \ll R$. Din triunghiul dreptunghic *ODA* avem:

$$r_m^2 = R^2 - \left(R - d_m\right)^2 = 2Rd_m - d_m^2 \approx 2Rd_m,$$

de unde

$$r_m = \sqrt{2Rd_m}. \qquad (3.24)$$

Diferenţa de drum optic în punctele unde grosimea penei de aer este $d_m$ are tot forma (3.20), însă se consideră $n \approx 1$ (pentru aer).

Dacă această diferenţă de drum constituie un număr par de semilungimi de undă, adică:

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = 2m\frac{\lambda}{2},$$

atunci inelul este luminos. Dacă însă se realizează condiţia de minim

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = \left(2m+1\right)\frac{\lambda}{2},$$

– inelul este întunecat. Determinând din aceste condiţii grosimea penei de aer $d_m$, pentru raza unui inel luminos, din (3.24) avem:

$$r_m^{\max} = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)R\lambda}, \qquad (3.25)$$

iar pentru unul întunecat:

$$r_m^{\min} = \sqrt{mR\lambda}. \qquad (3.26)$$

Se observă că raza primului inel luminos este $r_1^{\max} = \sqrt{R\lambda/2}$, în centrul inelelor formându-se o pată întunecată. Totodată, din aceste relaţii rezultă că la creşterea numărului *m*, razele inelelor vecine se măresc lent, adică interfranja se micşorează.

Aceste particularităţi se observă şi în *figura II* (planşa color, p. 162). Deoarece $r_m \sim \sqrt{\lambda}$, inelele lui Newton în lumină roşie (*fig. II, b*) au razele mai mari decât cele în lumină verde (*fig. II, a*). Dacă însă instalaţia este iluminată cu lumină albă, inelele au o structură spectrală: partea interioară a fiecărui inel este violetă, iar cea exterioară – roşie. Imaginea observată are o structură complexă cauzată de suprapunerea spectrelor de ordine diferite.

## e. Aplicaţii ale interferenţei luminii

Fenomenul de interferenţă a luminii este larg răspândit datorită diferitor aplicaţii atât în tehnică, cât şi în ştiinţă. Interferenţa se utilizează în măsurători de mare precizie ale diverselor mărimi fizice: lungimi, grosimi, alungiri (fenomene de dilatare), indici de refracţie ş.a. În acest scop au fost construite dispozitive, care, având la bază fenomenul de interferenţă a undelor, au fost numite **interferometre**. Metodele de măsurare elaborate constituie o ramură aparte, denumită **interferometrie**. Cu ajutorul interferometrului, care îi poartă numele, Michelson a determinat lungimea metrului-etalon, exprimată în lungimi de undă a radiaţiei roşii a cadmiului. Interferometrele sunt folosite pe larg în tehnică la controlul optic al calităţii prelucrării suprafeţelor, la măsurarea exactă a unghiurilor, la determinarea coeficienţilor de dilataţie, la păstrarea diferitor etaloane ale dimensiunilor, controlate prin metode interferometrice, la construcţia aparatelor de înaltă precizie etc. În cercetările ştiinţifice interferometria este utilizată la studiul structurii atomilor, a nucleelor atomice, la analiza diferitor procese fizice din interiorul corpurilor.

Una dintre cele mai importante aplicaţii ale interferenţei în lame subţiri o constituie aşa-numitele **straturi antireflex**. Este cunoscut că la trecerea luminii prin ocularele şi obiectivele dispozitivelor optice, care, deseori, sunt alcătuite din mai multe lentile, lumina parţial se reflectă, conducând la pierderi de intensitate. Pentru evitarea acestor pierderi, pe suprafeţele lentilelor se aplică un strat subţire transparent, de grosime şi indice de refracţie astfel alese, încât razele reflectate pe ambele feţe ale stratului să se anuleze prin interferenţă, adică să fie în opoziţie de fază. Întrucât în urma interferenţei energia luminoasă se redistribuie în spaţiu, această anulare a razelor reflectate conduce la creşterea intensităţii luminoase a razelor care pătrund în sistemul optic. Deoarece ochiul uman are o sensibilitate mai mare de percepere a radiaţiilor din regiunea verde-galben a spectrului, parametrii straturilor antireflex sunt aleşi astfel ca prin ele să treacă anume această radiaţie. Atunci în lumina reflectată vor predomina radiaţiile din regiunile roşie şi albastră ale spectrului, de aceea straturile respective par colorate într-o nuanţă albastră-purpurie. Din acest motiv, asemenea straturi antireflex se mai numesc **optică albastră**.

## Probleme rezolvate

❶ Un tablou de interferenţă este obţinut cu ajutorul unui dispozitiv Young, în care se foloseşte o radiaţie monocromatică cu lungimea de undă $\lambda = 0{,}6$ μm. În calea uneia din raze, perpendicular ei, se aşază o lamă de sticlă de grosime $d = 6$ μm şi indice de refracţie $n = 1{,}5$. Determinaţi cu câte franje se deplasează tabloul de interferenţă după introducerea lamei de sticlă.

| **Se dă:** | SI: |
|---|---|
| $\lambda = 0{,}6$ μm, | $6 \cdot 10^{-7}$ m, |
| $d = 6$ μm, | $6 \cdot 10^{-6}$ m |
| $n = 1{,}5$ | |
| $\Delta m - ?$ | |

**Rezolvare:**

Presupunem că în lipsa lamei de sticlă, într-un punct oarecare $P$ al ecranului se obţine un maxim de ordinul $m_1$. Condiţia de formare a acestuia, conform relaţiei (3.12), este

$$\Delta_1 = m_1\lambda,$$

unde $\Delta_1 = l_2 - l_1$ este diferenţa de drum optic, care, în acest caz, coincide cu cea geometrică, iar $l_2$ şi $l_1$ sunt, respectiv, distanţele de la sursele $S_2$ şi $S_1$ până la punctul de observaţie $P$ (*fig. 3.14*). Introducerea lamei de sticlă conduce la creşterea diferenţei de drum optic cu $d(n-1)$. Într-adevăr:

$$\Delta_2 = \left[\left(l_2 - d\right) + nd\right] - l_1 = l_2 - l_1 + \left(n-1\right)d = \Delta_1 + \left(n-1\right)d.$$

Întrucât diferenţa de drum optic s-a mărit în punctul $P$, poate fi observat un maxim de ordin $m_2 > m_1$ dacă se realizează condiţia:

$$\Delta_2 = m_2\lambda.$$

Făcând diferenţa relaţiilor pentru $\Delta_2$ şi $\Delta_1$, avem:

$$\Delta m = \frac{\left(n-1\right)d}{\lambda} = 5,$$

adică tabloul de interferenţă s-a deplasat cu 5 franje.

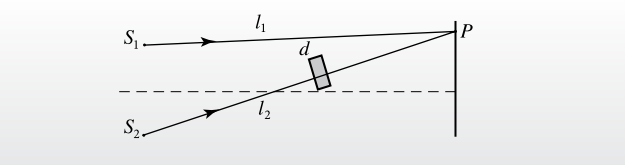



*Fig. 3.14*

❷ Razele a două inele Newton luminoase, observate în tabloul de interferenţă, sunt, respectiv, egale cu 2 mm şi 2,4 mm. Care este raza de curbură a lentilei plan-convexe folosită în experienţă, dacă inelele menţionate se observă în lumină reflectată ($\lambda = 0{,}5$ μm), iar între ele mai sunt încă 2 inele luminoase?

| **Se dă:** | SI: |
|---|---|
| $r_m = 2$ mm, | $2 \cdot 10^{-3}$ m, |
| $r_{m+3} = 2{,}4$ mm, | $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ m, |
| $\lambda = 0{,}5$ μm | $5 \cdot 10^{-7}$ m |
| $R - ?$ | |

**Rezolvare:**

Întrucât între inelele luminoase de raze măsurate se află încă 2 inele de acelaşi tip, primul fiind de ordinul $m$, rezultă că celălalt este de ordinul $m + 3$. Conform relaţiei (3.25), pentru razele inelelor luminoase măsurate avem:

$$r_m^2 = \left(m - \frac{1}{2}\right)R\lambda, \quad r_{m+3}^2 = \left(m + 3 - \frac{1}{2}\right)R\lambda.$$

Făcând diferenţa acestor relaţii, obţinem:

$$r_{m+3}^2 - r_m^2 = 3R\lambda,$$

de unde

$$R = \frac{r_{m+3}^2 - r_m^2}{3\lambda}.$$

Introducând valorile numerice, pentru raza de curbură a lentilei se obţine $R \approx 1{,}2$ m.

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care sunt particularităţile undelor coerente de lumină?
2. Ce reprezintă timpul de coerenţă? Dar distanţa de coerenţă?
3. Ce se numeşte drum optic? Ce reprezintă diferenţa de drum optic?
4. Care sunt condiţiile de formare a maximelor şi minimelor de interferenţă a undelor luminoase şi prin ce se deosebesc ele de cazul celor mecanice?
5.* Care este construcţia dispozitivului lui Young? Descrieţi tabloul de interferenţă obţinut cu acest dispozitiv.
6.* Ce se numeşte interfranjă şi cum poate fi determinată cu ajutorul ei lungimea de undă a luminii?
7.* Care sunt particularităţile tabloului de interferenţă obţinut la compunerea undelor de lumină albă (compusă)?
8.* Care este diferenţa de drum optic a razelor reflectate pe lamă? De ce franjele tabloului de interferenţă în acest caz sunt numite de egală înclinare?
9.* Cum se explică culorile peliculelor subţiri?
10.* Cum se explică formarea inelelor lui Newton?
11. Unde se aplică interferenţa?
12.* Pentru determinarea lungimii de undă a unei surse de lumină monocromatică, aceasta a fost folosită într-un dispozitiv Young, care avea distanţa dintre fante de 1 mm, iar de la fante până la ecran – de 2 m. Care este lungimea de undă, dacă distanţa dintre două maxime consecutive este de 1,2 mm?
13.* O lentilă plan-convexă este aşezată cu partea convexă pe o placă de sticlă. Sistemul este iluminat cu o radiaţie monocromatică de lungime de undă $\lambda = 0{,}6$ μm incidentă normal. Determinaţi grosimea stratului de aer în punctul unde în lumina reflectată se observă al patrulea minim de interferenţă.

# 3.8. DIFRACŢIA LUMINII

## a. Studiul calitativ al difracţiei luminii

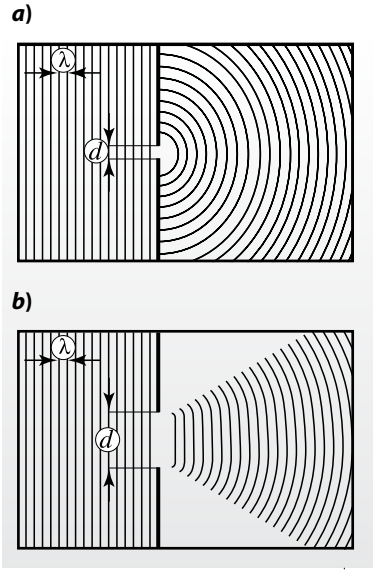



*Fig. 3.15*

**Să ne amintim**

Este cunoscut (din clasa a X-a) că fenomenul de difracţie a undelor mecanice reprezintă pătrunderea lor în regiunea de umbră a diferitor obstacole întâlnite în calea de propagare. Vom descrie succint esenţa acestui fenomen în cazul undelor de pe suprafaţa apei.

Fenomenul de difracţie se observă atunci când dimensiunile obstacolelor aflate în calea propagării undelor sunt comparabile sau mai mici decât lungimea de undă.

Propagarea undelor în apropierea obstacolelor se explică în baza principiului Huygens:

**Orice punct al mediului până la care a ajuns unda la momentul dat devine sursă de unde sferice secundare, iar înfăşurătoarea lor geometrică la un moment ulterior reprezintă noul front de undă.**

În *figura 3.15* este ilustrat fenomenul de difracţie realizat de undele de pe suprafaţa apei dintr-o cuvă. Se observă că în cazul dimensiunilor fantei comparabile cu lungimea de undă, difracţia începe chiar în imediata apropiere a fantei (*fig. 3.15, a*). Pentru obstacole de dimensiuni mari (*fig. 3.15, b*) efectele fenomenului de difracţie se pot observa, dar numai la distanţe mari de la acestea. Cu cât obstacolul este mai departe de la punctul analizat, cu atât denaturarea frontului de undă devine mai evidentă.

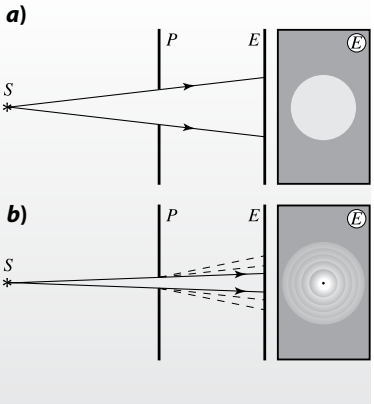



*Fig. 3.16*

Dacă lumina reprezintă un proces ondulatoriu, atunci trebuie să existe şi fenomenul de difracţie a ei, iar condiţiile de observare a acestuia trebuie să fie similare cu cele din cazul undelor mecanice. Cu alte cuvinte, pentru observarea difracţiei luminii în apropierea obstacolului este nevoie ca acesta să fie de dimensiuni comparabile cu lungimea de undă a luminii, adică de ordinul micrometrilor ($10^{-6}$ m).

Să analizăm procesul de propagare a luminii de la o sursă punctiformă când în calea ei este situat un paravan *P*, prevăzut cu o diafragmă, care limitează o deschidere circulară reglabilă (*fig. 3.16*). Dacă deschiderea diafragmei este mare, pe ecranul *E* se observă o pată luminoasă cu un contur distinct, urmată de regiunea de umbră (*fig. 3.16, a*). Dimensiunile petei luminoase se determină uşor prin metode geometrice, considerând razele de lumină nişte linii drepte. Prin analogie cu undele de pe suprafaţa apei, dacă vom îndepărta ecranul de paravan la o distanţă mult mai mare decât diametrul diafragmei, vom remarca o uşoară pătrundere a luminii în regiunea de umbră, adică dispariţia conturului distinct al petei luminoase.

Efectul fenomenului de difracţie este mai pronunţat în cazul obstacolelor de dimensiuni mult mai mici decât distanţa până la ecran. La micşorarea considerabilă a diametrului diafragmei din paravanul *P*, pe ecranul *E* se formează o serie de inele alternativ luminoase şi întunecate (*fig. 3.16, b*). Imaginea obţinută pe ecran în asemenea situaţie este numită **tablou de difracţie**. Acesta demonstrează că în apropierea obstacolelor lumina nu se propagă rectiliniu, ea poate pătrunde şi în regiunea de um-

bră. Tabloul de difracţie depinde de forma şi dimensiunile obstacolului. Dacă vom varia dimensiunile diafragmei, menţinându-le, totodată, comparabile cu lungimea de undă, vom observa că în tabloul de difracţie inelele luminoase devin întunecate şi, invers, cele întunecate – luminoase. Forma tabloului de difracţie întotdeauna o repetă pe cea a obstacolului. Tabloul de difracţie se observă uneori şi în condiţii obişnuite. De exemplu, inelele colorate care se observă în jurul surselor de lumină, privite în condiţii de ceaţă sau prin geamuri aburite, apar din cauza difracţiei luminii pe particulele foarte mici de apă, care constituie obstacole de dimensiuni comparabile cu lungimea de undă.

Fenomenul difracţiei luminii a fost observat pentru prima dată de către savantul italian Francesco Grimaldi (1618–1663), însă a fost explicat abia în 1818 de către fizicianul francez A.J. Fresnel (1788–1827). Pentru aceasta, el a completat principiul lui Huygens cu noţiunea despre interferenţa undelor secundare (numit ulterior principiul Huygens–Fresnel).

**Orice punct al mediului până la care ajunge unda luminoasă la momentul dat devine sursă de unde sferice secundare coerente, care apoi interferează, iar rezultatul interferenţei reprezintă noul front de undă.**

În baza acestui principiu, Fresnel a demonstrat, din punct de vedere teoretic, redistribuirea intensităţii luminoase sub formă de maxime şi minime şi propagarea rectilinie a luminii, chiar dacă aceasta este o undă. Astfel, teoria lui Fresnel a constituit cel mai convingător argument la confirmarea naturii ondulatorii a luminii.

### b. Difracţia luminii de la o fantă. Reţeaua de difracţie

Principiul Huygens–Fresnel permite a înţelege cum are loc formarea tabloului de difracţie. Admitem că sursa de lumină se află în focarul lentilei convergente $L_1$ (*fig. 3.17*). Atunci la paravanul $P$ ajunge frontul unei unde plane, care nimereşte pe o fantă îngustă de lăţime comparabilă cu lungimea de undă. Conform principiului Huygens–Fresnel, fiecare punct de pe suprafaţa fantei devine sursă de unde sferice secundare coerente. (În *figura 3.17*, din infinitatea de puncte ale frontului de undă sunt indicate doar trei.) De la acestea se propagă unde coerente de-a lungul unor raze situate sub diferite unghiuri $\varphi \leq \pi/2$ faţă de normala la planul fantei. Evident, de la fiecare punct-sursă de unde secundare, din multitudinea de direcţii se va găsi câte o rază, situată sub unul şi acelaşi unghi: de exemplu, razele (*1*) sub unghiul $\varphi = 0$ şi razele (*2*) sub un unghi arbitrar $\varphi$. Întrucât undele luminoase ce se propagă de la fantă sunt coerente şi parcurg distanţe diferite, ele sunt caracterizate de o anumită diferenţă de drum optic şi, în funcţie de condiţia maximal sau minimal îndeplinită, în punctul de observaţie se va forma o franjă luminoasă sau întunecată. Deoarece razele cercetate sunt paralele, pentru observarea tabloului de difracţie este utilizată lentila $L_2$ în focarul căreia este aşezat ecranul $E$ (*fig. 3.17*). În *figura III* (planşa color, p. 162) este reprezentat tabloul de difracţie obţinut la iluminarea unei fante înguste cu lumină roşie.

Observarea difracţiei luminii de la o singură fantă este însoţită de dificultăţi legate de intensitatea luminoasă destul de redusă a franjelor. S-a constatat că pentru obţinerea unui tablou de difracţie mai pronunţat, lumina trebuie transmisă printr-un sistem de fante. Într-adevăr, cu cât numărul de fante este mai mare, cu atât mai multă lumină pătrunde prin ele. Totodată, o franjă luminoasă observată pe ecran este rezultatul nu numai al difracţiei, adică al interferenţei undelor sferice secundare, dar şi al interferenţei undelor ce sosesc în acel punct al ecranului de la diferite fante. Cu alte cuvinte, intensitatea luminoasă a franjei obţinute de la o fantă este amplificată de acţiunea celorlalte.

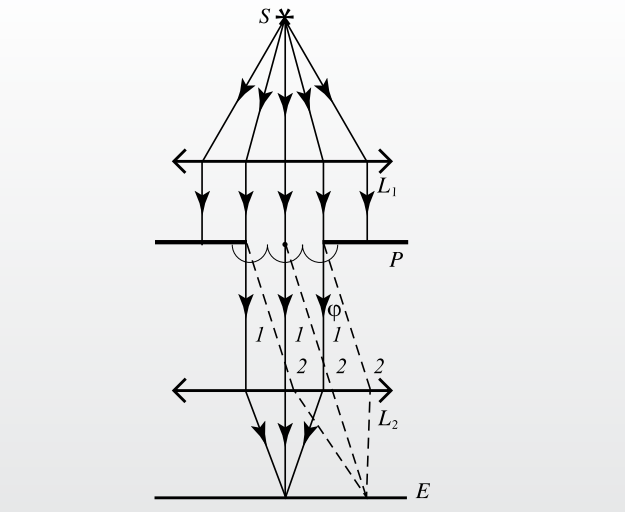



*Fig. 3.17*

Această metodă de amplificare a intensităţii luminoase a tabloului de difracţie stă la baza dispozitivului numit **reţea de difracţie**. Ea este alcătuită dintr-un număr mare de fante înguste paralele, rectilinii, egale, echidistante şi foarte apropiate una de alta. Reţelele de difracţie sunt confecţionate din plăci transparente sau reflectătoare (oglinzi plane). În ambele cazuri pe suprafaţa materialului sunt trasate un număr $N$ de linii (zgârieturi) echidistante. În prezent se confecţionează reţele de difracţie, care conţin mai mult de 1 000 de linii (zgârieturi) pe fiecare milimetru de lungime, numărul total $N$ ajungând până la sute de mii. Liniile reprezintă suprafeţe cu multe asperităţi, de aceea împrăştie lumina incidentă pe reţea, iar spaţiile dintre ele, rămânând transparente sau reflectătoare, îndeplinesc rolul fantelor reţelei.

O caracteristică importantă a reţelei de difracţie este **constanta reţelei** sau **perioada** ei, care reprezintă suma dintre lăţimile unei fante şi a unui spaţiu opac (*fig. 3.18*): $d = a + b$, unde $a$ este lăţimea unei fante, iar $b$ – a unei zgârieturi. Dacă se cunoaşte numărul de trăsături (fante) pe o unitate de lungime $l$, adică $n = N/l$, atunci pentru perioada reţelei putem scrie:

$$d = \frac{l}{N} = \frac{1}{n}. \qquad (3.27)$$

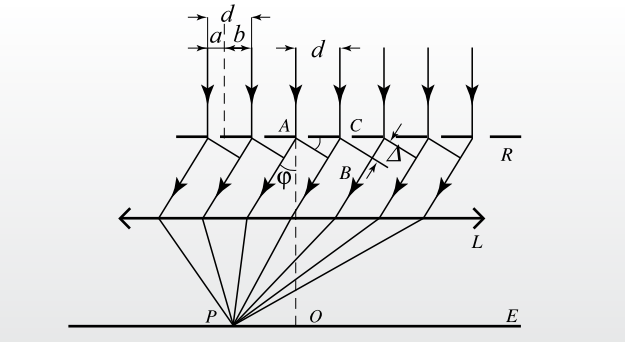



*Fig. 3.18*

Să cercetăm procesul de formare a tabloului de difracţie. Presupunem că pe suprafaţa unei reţele de difracţie cade normal un fascicul de raze paralele de lumină monocromatică, având lungimea de undă $\lambda$. După trecerea prin reţea, în urma fenomenului de difracţie, lumina se propagă în toate direcţiile posibile, de-a lungul unor raze sub formă de unde coerente, iar interferenţa lor amplifică intensitatea luminoasă numai pe anumite direcţii. Aceste direcţii se determină respectându-se condiţia că diferenţa de drum optic dintre undele coerente provenite de la două fante consecutive trebuie să constituie un număr par de semilungimi de undă (condiţia maximelor de interferenţă (3.12)), adică:

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Totodată, din *figura 3.18* se observă că diferenţa de drum optic $\Delta$ se exprimă prin constanta reţelei $d$. Într-adevăr, din triunghiul dreptunghic $ABC$ avem:

$$\Delta = d \sin\varphi$$

şi din ultimele două relaţii obţinem:

$$d \sin\varphi = \pm m\lambda, \qquad (3.28)$$

numită **formula reţelei de difracţie**. Ea exprimă condiţia de obţinere a franjelor luminoase (**maximelor principale**) în urma transmiterii luminii printr-o reţea de difracţie.

În formula (3.28) unghiul $\varphi$ este numit **unghi de difracţie**, iar $m = 1, 2, 3, \ldots$ . Pentru $m = 0$ se obţine o franjă caracterizată de cea mai mare intensitate luminoasă. Acestei franje i se mai spune **maxim central** sau **maxim de ordinul zero**. Dacă $m \geq 1$, pe ecran se vor observa câte două maxime principale de aceeaşi intensitate dispuse simetric faţă de maximul central şi numite **maxime de ordinul *m***. În *figura IV, a* şi *b* (planşa color, p. 162) sunt prezentate spectrele obţinute cu o reţea de difracţie iluminată cu lumină violetă şi, respectiv, roşie. După cum se constată din experienţe, odată cu creşterea ordinului maximelor intensitatea lor luminoasă se micşorează, iar mărirea numărului de fante (micşorarea perioadei $d$) conduce la creşterea distanţei dintre franjele luminoase.

Dacă reţeaua de difracţie este iluminată cu lumină albă, atunci tabloul de difracţie apare colorat, obţinându-se câte un spectru pentru fiecare ordin al tabloului (*fig. IV, c*). Menţionăm că în acest caz s-a folosit o reţea de difracţie mai performantă decât cea utilizată la obţinerea spectrelor din *figura IV, a* şi *b*.

## Problemă rezolvată

Un fascicul de lumină monocromatică de lungime de undă $\lambda = 0{,}6$ μm cade normal pe suprafaţa unei reţele de difracţie. Tabloul de difracţie este proiectat pe un ecran, situat la distanţa $D = 1$ m de la reţea. Se constată că distanţa dintre maximele central şi principal de ordinul $m = 1$ este $l = 15$ cm. Determinaţi: a) perioada reţelei de difracţie; b) numărul total de maxime principale, obţinut cu această reţea; c) unghiul de difracţie ce corespunde direcţiei în care se formează ultimul maxim principal.

| **Se dă:** | SI: |
|---|---|
| $\lambda = 0{,}6$ μm, | $6 \cdot 10^{-7}$ m |
| $D = 1$ m, | |
| $m = 1$, | |
| $l = 15$ cm | 0,15 m |
| $d - ?$, $N - ?$, $\varphi_m - ?$ | |

**Rezolvare:**

**a)** Perioada reţelei de difracţie se determină din formula (3.28):

$$d = \frac{m\lambda}{\sin\varphi}.$$

Din *figura 3.19* se observă că $\operatorname{tg}\varphi = l/D$. Deoarece $D >> l$, unghiul $\varphi$ este mic şi $\operatorname{tg}\varphi \approx \sin\varphi$. Atunci pentru perioada reţelei obţinem:

$$d = \frac{m\lambda D}{l} = 4\ \mu\text{m}.$$

**b)** Întrucât maximele principale sunt dispuse simetric în stânga şi în dreapta de la cel central, rezultă că numărul lor total este:

$$N = 2m_{\max} + 1,$$

unde $m_{\max}$ este ordinul ultimului maxim, care poate fi observat cu această reţea. Lumina transmisă de o reţea de difracţie se propagă de la aceasta sub unghiuri cuprinse între 0 şi $\pm\pi/2$. Atunci din (3.28), când $\sin\varphi = 1$, avem:

$$m_{\max} \le \frac{d}{\lambda} \approx 6{,}67.$$

Aşa cum ordinul maximelor trebuie să fie un număr întreg, rezultă că $m_{\max} = 6$, iar numărul total de maxime $N = 13$.

**c)** Unghiul de difracţie ce determină direcţia în care se formează ultimul maxim se calculează tot din (3.28), dar scrisă pentru această direcţie:

$$d\sin\varphi_m = m_{\max}\lambda.$$

Exprimând unghiul $\varphi_m$ din expresia de mai sus, obţinem:

$$\varphi_m = \arcsin\left(\frac{m_{\max}\lambda}{d}\right),$$

din care numeric avem $\varphi_m \approx 64^\circ$.

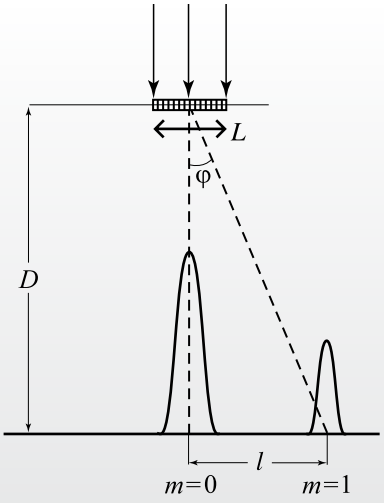



*Fig. 3.19*

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care este esenţa fenomenului de difracţie a undelor mecanice?
2. Care trebuie să fie ordinul dimensiunilor obstacolelor întâlnite în calea undelor de lumină pentru a observa fenomenul de difracţie? De ce?
3. Ce reprezintă tabloul de difracţie a luminii? Explicaţi modul de formare a lui la difracţia pe diferite obstacole.
4. Formulaţi principiul Huygens–Fresnel. Ce explică acest principiu?
5. Cum se explică, din punct de vedere calitativ, formarea tabloului de difracţie pe o fantă îngustă?
6. Ce reprezintă o reţea de difracţie? Cu ce este egală perioada ei?
7. Care este formula reţelei de difracţie şi ce exprimă ea?
8. Caracterizaţi tabloul de difracţie, obţinut cu o reţea. Cum se modifică acesta în funcţie de valoarea perioadei reţelei de difracţie?
9. Lumina cu lungimea de undă $\lambda = 0{,}6$ μm cade normal pe o reţea de difracţie transparentă. Determinaţi perioada reţelei şi unghiul maxim de difracţie, dacă se cunoaşte că maximul de ordinul 4 se formează pentru unghiul de difracţie de 30°, iar ordinul ultimului maxim este $m_{\max} = 7$.
10.* Pe o reţea de difracţie cade normal lumină monocromatică cu lungimea de undă $\lambda = 0{,}41$ μm. Unghiul $\Delta\varphi$ dintre direcţiile spre maximele principale de ordinele 1 şi 2 este de 2,35°. Determinaţi numărul de fante pe milimetru al reţelei de difracţie.

## Determinarea lungimii de undă a luminii cu ajutorul reţelei de difracţie

| | |
|---|---|
| *Scopul lucrării:* | Determinarea limitelor lungimii de undă ale spectrului vizibil. |
| *Aparate şi materiale necesare:* | Un stativ, o reţea de difracţie, un dispozitiv pentru determinarea lungimii de undă a luminii, o sursă de lumină albă. |

### Consideraţii teoretice

Dispozitivul folosit în această lucrare de laborator pentru determinarea lungimii de undă a luminii reprezintă o riglă gradată în milimetri, având la unul din capete o ramă, în care se montează reţeaua de difracţie. La celălalt capăt se află un ecran, situat perpendicular pe riglă, care se poate deplasa de-a lungul ei. Ecranul are o fantă îngustă la mijloc şi este înzestrat cu o scală milimetrică cu zero la centrul fantei.

Privind la sursa de lumină prin reţea şi fantă concomitent (*fig. 3.20*), observatorul va vedea pe ecran de ambele părţi ale fantei spectrele colorate de difracţie de ordinele 1, 2 ş.a.m.d. În figură este reprezentat schematic modul de formare a maximelor (spectrelor) cu ajutorul acestui dispozitiv. Fiecare maxim reprezintă un spectru, marginile căruia se află la distanţele $l_\upsilon$ şi $l_r$ de la centrul fantei.

Poziţia maximului principal de ordinul $m = 1$ se determină din relaţia (3.28), în care $\lambda$ este lungimea de undă a luminii de culoarea cercetată a spectrului, $d$ perioada reţelei de difracţie, iar $\varphi$ unghiul sub care este observat maximul respectiv. Întrucât pentru maximul principal de ordinul 1 unghiul $\varphi$ este întotdeauna mic ($\varphi < 5^o$), atunci $\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi = l/L$ (*fig. 3.20*). Aşadar, pentru determinarea lungimii de undă a luminii, obţinem relaţia:

$$\lambda = \frac{ld}{L}, \qquad (3.29)$$

unde $L$ este distanţa dintre reţeaua de difracţie şi ecran.

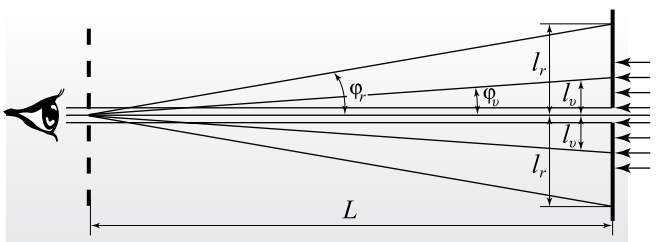



*Fig. 3.20*

### Mod de lucru:

*Fig. 3.21*

**1.** Montaţi reţeaua de difracţie în rama dispozitivului şi fixaţi-l de cleştele stativului (*fig. 3.21*).

**2.** Privind prin reţeaua de difracţie, orientaţi dispozitivul spre sursa de lumină, astfel încât ea să fie văzută prin fanta îngustă a ecranului. Pe ecran, de o parte şi de alta a fantei, veţi observa spectrele de difracţie de câteva ordine.

**3.** Citiţi de pe scala ecranului, privit prin reţea, poziţiile marginilor roşie $l_r$ şi violetă $l_\upsilon$ ale spectrului de ordinul 1 de pe ambele părţi ale fantei. Determinaţi valorile medii ale distanţelor $l_r$ şi $l_\upsilon$ pentru fiecare culoare şi introduceţi-le în tabelul de mai jos.

**4.** De pe rigla gradată în milimetri a dispozitivului notaţi distanţa $L$ dintre reţea şi ecran, introducând-o, de asemenea, în tabel.

**5.** Repetaţi măsurătorile din sarcinile 3 şi 4 pentru alte două poziţii ale ecranului faţă de reţeaua de difracţie şi introduceţi rezultatele în acelaşi tabel.

| Nr. | $d$ ($10^{-5}$ m) | $L$ (m) | $l_r$ (cm) | $l_\upsilon$ (cm) | $\lambda_r$ ($10^{-6}$ m) | $\lambda_\upsilon$ ($10^{-6}$ m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| Valoarea medie | | | | | | |

**6.** În baza relaţiei (3.29), calculaţi lungimile de undă $\lambda_r$ şi $\lambda_\upsilon$, ce constituie limitele spectrului vizibil, apoi valorile lor medii.

**7.** Estimaţi erorile absolută şi relativă la determinarea lungimii de undă a luminii pentru cele două culori, folosind următoarele relaţii:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\overline{\lambda}}{\overline{\lambda}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}, \qquad \Delta\overline{\lambda} = \varepsilon \cdot \overline{\lambda}.$$

În calcule, pentru $\Delta l$ şi $\Delta L$ se va lua eroarea aparatului de măsură.

**8.** Prezentaţi rezultatul final sub forma:

$$\lambda_r = \left(\overline{\lambda}_r \pm \Delta\overline{\lambda}_r\right) \cdot 10^{-6}\ \text{m}; \quad \varepsilon_r = \cdots\%,$$
$$\lambda_\upsilon = \left(\overline{\lambda}_\upsilon \pm \Delta\overline{\lambda}_\upsilon\right) \cdot 10^{-6}\ \text{m}; \quad \varepsilon_\upsilon = \cdots\%.$$

**9.** Formulaţi concluziile referitoare la rezultatele obţinute.

# 3.9.* POLARIZAREA LUMINII

Fenomenele de interferenţă şi de difracţie demonstrează foarte clar caracterul ondulatoriu al luminii. Ele au fost explicate fără a utiliza cunoştinţele despre caracterul undelor: transversale sau longitudinale. Există însă situaţii când procesele de propagare a luminii pot fi justificate doar dacă lumina este considerată o undă transversală.

Pentru a înţelege fenomenul de polarizare a luminii, vom analiza mai întâi starea de polarizare a undelor elastice.

**Dacă direcţia de oscilaţie a particulelor mediului variază în timp după o anumită lege, atunci unda se numeşte *polarizată*.**

## a. Modelul mecanic al stării de polarizare. Planul de polarizare

Se presupune că o coardă elastică este impusă să oscileze într-un plan numit **plan de oscilaţie**, adică prin coardă se propagă o undă transversală. Întrucât oscilaţiile corzii se produc tot timpul în unul şi acelaşi plan (planul *xOy* în *figura 3.22*), legea de variaţie a direcţiei elongaţiei este liniară (dreapta *AB*), iar unda este numită **plan-polarizată** sau **liniar-polarizată**.

**Planul format de direcţia de oscilaţie şi cea de propagare a undei este numit *plan de polarizare*.**

Starea de polarizare a undei transversale depinde de natura obstacolelor întâlnite în timpul propagării. Dacă în calea undei este aşezată o fantă, planul căreia coincide cu cel de polarizare, atunci unda îşi păstrează starea de polarizare (*fig. 3.23, a*). Când planul fantei se roteşte, această stare se modifică. Din figură se observă că după trecerea prin fantă, unda se propagă în acelaşi plan de polarizare, însă cu cât unghiul $\varphi$ este mai mare, cu atât amplitudinea ei este mai mică (*fig. 3.23, b*). Dacă planul fantei este perpendicular pe cel de polarizare ($\varphi = 90^o$), fanta reţine complet unda incidentă pe ea (*fig. 3.23, c*).

Situaţia este total diferită când pe fantă cade o undă longitudinală. Întrucât oscilaţiile se produc de-a lungul direcţiei de propagare, această undă traversează fanta întotdeauna, indiferent de orientarea acesteia. Rezultă:

starea de polarizare este proprie doar undelor transversale.

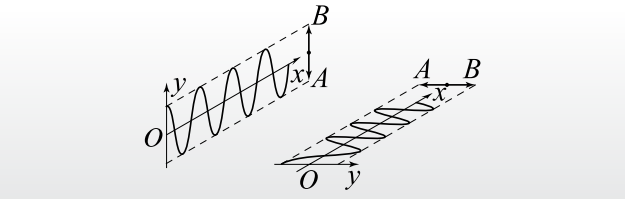



*Fig. 3.22*

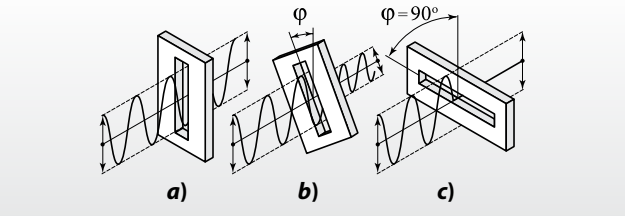



*Fig. 3.23*

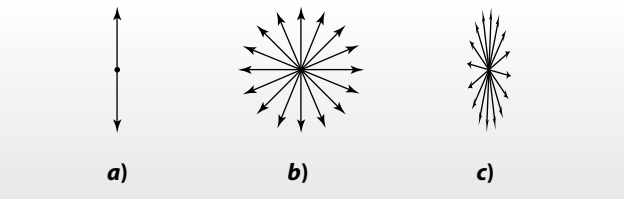



*Fig. 3.24*

## b. Starea de polarizare a luminii. Transversalitatea undelor de lumină

Lumina emisă de un singur atom reprezintă o undă electromagnetică caracterizată de oscilaţiile a doi vectori: ale vectorului intensităţii câmpului electric $\vec{E}$ şi ale vectorului inducţiei câmpului magnetic $\vec{B}$ reciproc perpendiculari. Vectorii $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ sunt perpendiculari pe direcţia de propagare a undei, numită **rază de lumină**. Este evident că în acest caz lumina este **plan-polarizată**, deoarece oscilaţiile vectorilor $\vec{E}$ şi $\vec{B}$ se produc în aceleaşi plane, reciproc perpendiculare.

Cercetările experimentale şi cele teoretice demonstrează că acţiunea luminii asupra substanţei este determinată în mod principal de vibraţiile vectorului $\vec{E}$, adică de componenta electrică a undei electromagnetice. Anume această componentă produce senzaţia de lumină asupra ochiului uman şi acţionează asupra peliculei fotografice. Vectorul intensităţii câmpului electric $\vec{E}$ deseori mai este numit şi **vector luminos**, iar raza de lumină polarizată este reprezentată schematic printr-o curbă descrisă de vârful vectorului $\vec{E}$ pe planul de oscilaţie. Starea de polarizare a luminii emise de un singur atom este reprezentată în

*figura 3.24, a*, în care vectorii corespund valorilor de amplitudine ale intensităţii câmpului electric $\vec{E}$, iar raza de lumină este perpendiculară pe planul figurii.

Sursele reale de lumină sunt compuse dintr-un număr foarte mare de atomi care emit unde luminoase, în care vectorul $\vec{E}$ se poate afla în orice planuri, adică vibrează haotic. În consecinţă, oricărei raze de lumină provenite de la sursele reale (naturale) îi corespunde o mulţime de planuri de oscilaţie orientate cu aceeaşi probabilitate în toate direcţiile (*fig. 3.24, b*). Astfel de lumină se numeşte **lumină naturală**.

Intensitatea radiaţiei fiecărui atom al sursei de lumină este aproximativ aceeaşi, de aceea în cazul luminii naturale valorile de amplitudine ale vectorului $\vec{E}$ în toate planurile de oscilaţie sunt practic egale. Uneori însă raza de lumină în anumite planuri de oscilaţie este caracterizată de valori maxime ale vectorului luminos. În asemenea cazuri se spune că lumina este **parţial polarizată**. În *figura 3.24, c* este reprezentată o rază de lumină parţial polarizată, în care oscilaţiile vectorului luminos au loc preponderent în planul vertical.

Pentru descrierea cantitativă a stării de polarizare a luminii a fost introdusă noţiunea de **grad de polarizare**. Dacă $I_{max}$ şi $I_{min}$ sunt valorile maximă şi minimă ale intensităţii luminii ce corespund proiecţiilor vectorului luminos $\vec{E}$ pe două direcţii reciproc perpendiculare, atunci gradul de polarizare al luminii este:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \qquad (3.30)$$

Gradul de polarizare este o mărime adimensională şi prezintă valori cuprinse între 0 şi 1. În cazul luminii total polarizate $I_{min} = 0$ şi din (3.30) rezultă $P = 1$, iar pentru lumina naturală intensitatea căreia în toate direcţiile este aceeaşi, adică $I_{min} = I_{max}$, avem $P = 0$.

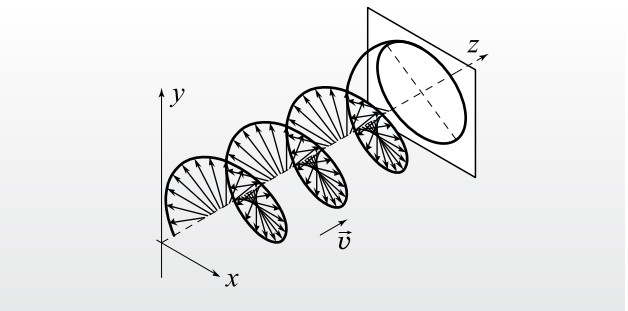



*Fig. 3.25*

Sunt cunoscute şi alte stări de polarizare a luminii. De exemplu, dacă vectorul luminos $\vec{E}$ descrie într-un plan perpendicular pe direcţia de propagare o elipsă care se deplasează în timp odată cu unda (*fig. 3.25*), atunci lumina este **polarizată eliptic**. Evident, în anumite condiţii elipsa descrisă de vârful vectorului $\vec{E}$ poate degenera într-un cerc. În aceste cazuri se spune că lumina este **circular polarizată**.

Studierea stării de polarizare a luminii a devenit posibilă abia la începutul secolului al XIX-lea în urma cercetărilor efectuate independent de către fizicienii Th. Young şi A.J.Fresnel care au înaintat ideea despre **transversalitatea undelor luminoase**. Existenţa undelor electromagnetice şi transversalitatea lor a fost demonstrată teoretic de Maxwell cu jumătate de secol mai târziu, când deja era confirmat experimental faptul că undele de lumină sunt transversale. Din această cauză transversalitatea undelor electromagnetice a fost pentru Maxwell cel mai important argument în confirmarea justeţei teoriei electromagnetice a luminii.

Dispozitivul care permite transformarea luminii naturale în lumină polarizată este numit **polarizator**.

În cazul polarizării liniare aceste dispozitive permit să treacă doar acele vibraţii ale vectorului luminos, care se produc într-o singură direcţie *OO′* (*fig. 3.26*). Acţiunea polarizatorului *P* este similară cu cea a fantei din *figura 3.23*. Ochiul uman nu poate deosebi lumina polarizată de cea naturală, observă doar o micşorare a intensităţii luminii emergente prin polarizator $I_p$ în comparaţie cu intensitatea luminii naturale $I_n$ incidentă pe polarizator, $I_p < I_n$.

Pentru a stabili starea de polarizare a luminii, se foloseşte un al doilea dispozitiv de polarizare, *A*, numit **analizor**, care facilitează trecerea oscilaţiilor vectorului luminos numai după o anumită direcţie *BB′* sub un unghi φ cu direcţia *OO′*. Se constată că la rotirea analizorului cu 360° în jurul razei intensitatea luminii emergente prin analizor $I_t$ variază, obţinând de câte două ori valori maxime $I_{max}$ şi valori minime $I_{min}$, ceea ce permite calcularea gradului de polarizare *P* (3.30).

În calitate de dispozitive de polarizare sunt folosite diferite cristale naturale anizotrope, cum ar fi turmalina, spatul-de-Islanda, cuarţul ş.a. Anizotropia lor se manifestă prin absorbţia puternică a luminii caracterizată de oscilaţiile vectorului luminos de o anumită direcţie, lăsând să treacă aproape fără

absorbţie lumina caracterizată de vibraţiile perpendiculare pe această direcţie. Există însă şi polarizatoare artificiale. Ele reprezintă nişte pelicule acoperite cu un strat de molecule lungi de structură complicată, aşezate compact cu axele paralele. Astfel se obţine o reţea de fante cu perioada extrem de mică care permite trecerea luminii caracterizată numai de o anumită direcţie de vibraţie a vectorului luminos. Aceste pelicule sunt numite **polaroizi** şi au fost obţinute pentru prima dată în anul 1928 de către savantul şi inventatorul american Edwin Land (1909–1991), care ulterior a elaborat bazele fotografiei momentane.

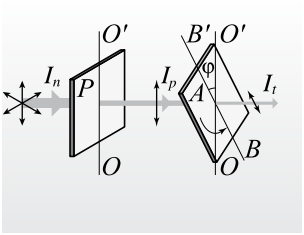


*Fig. 3.26*

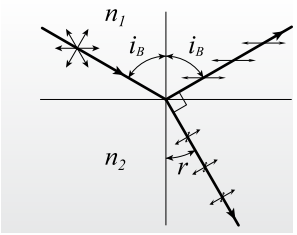


*Fig. 3.27*

## c. Polarizarea luminii prin reflexie

Starea de polarizare a luminii poate fi realizată şi prin alte metode. Una dintre acestea este reflexia luminii pe un mediu dielectric. Dacă lumina naturală de la Soare este incidentă sub un unghi $i$ pe suprafaţa orizontală a şoselei sau a unui lac, atunci, în funcţie de valoarea unghiului de incidenţă pe anumite regiuni ale suprafeţei, vom observa licăriri de lumină. Aceste licăriri se datorează faptului că raza reflectată este polarizată. Într-adevăr, dacă privim printr-un polaroid cu axă verticală, atunci licăririle dispar. Rezultă că lumina reflectată este parţial polarizată preponderent într-un plan paralel cu suprafaţa reflectătoare.

Gradul de polarizare a razei reflectate depinde de unghiul de incidenţă. S-a constatat că la incidenţa normală a luminii naturale pe o suprafaţă dielectrică ($i = 0$) raza reflectată nu este polarizată, dar pentru unghiuri de incidenţă cuprinse în intervalul $0 < i < \pi/2$ atât raza reflectată, cât şi cea refractată sunt parţial polarizate în planuri reciproc perpendiculare (*fig. 3.27*). La unghiul de incidenţă $i_B$, pentru care raza reflectată este perpendiculară pe cea refractată, lumina reflectată este total polarizată, iar cea refractată – maxim polarizată, dar nu total. Din clasa a IX-a cunoaştem legea refracţiei luminii

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1},$$

unde $n_1$ este indicele absolut de refracţie al mediului în care se propagă raza incidentă, iar $n_2$ – al mediului de la care se produce reflexia.

După cum se observă din *figura 3.27*, în acest caz $r + i_B = 90^\circ$. Prin urmare

$$\frac{\sin i_B}{\sin\left(90^\circ - i_B\right)} = \frac{n_2}{n_1}$$

sau

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (3.31, a)$$

Aşadar, **unghiul de polarizare totală** $i_B$ se exprimă prin indicii absoluţi de refracţie ai mediilor de pe ambele părţi ale suprafeţei de separare. Raportul $n_2/n_1 = n_{21}$ este indicele relativ de refracţie al mediului al doilea în raport cu primul. Astfel,

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}. \qquad (3.31, b)$$

Unghiul de polarizare totală $i_B$ mai este numit **unghiul Brewster**, în cinstea fizicianului scoţian David Brewster (1781–1868), iar relaţia (3.31, *a* sau *b*) exprimă legea lui Brewster stabilită experimental în anul 1815:

> ***Unghiul de polarizare totală*** **este determinat de indicele relativ de refracţie al mediului al doilea în raport cu primul.**

## Problemă rezolvată

Sub ce unghi faţă de orizont trebuie să se afle Soarele pentru ca razele de lumină reflectate pe suprafaţa unui lac să fie total polarizate? Indicele de refracţie al apei este 1,33.

**Se dă:**
$n = 1{,}33$
$\alpha - ?$

**Rezolvare:**

Razele de lumină reflectate pe suprafaţa lacului vor fi total polarizate atunci când cele solare vor fi incidente sub unghiul Brewster care se determină uşor din relaţia (3.31, *b*):

$$i_B = \operatorname{arctg} n.$$

Întrucât unghiul de reflexie este egal cu cel de incidenţă $i_B$, pentru unghiul $\alpha$ pe care-l fac razele solare cu orizontul obţinem:

$$\alpha = 90^\circ - i_B = 90^\circ - \operatorname{arctg} n \approx 36{,}93^\circ \approx 36^\circ 56'.$$

## Verificați-vă cunoștințele

1. Care unde se numesc polarizate?
2. Ce reprezintă planul de polarizare?
3. Explicaţi modelul mecanic al stării de polarizare a undelor. De ce starea de polarizare este proprie doar undelor transversale?
4. Definiţi noţiunea de grad de polarizare. Ce valori poate lua această mărime?
5. Cum se explică transversalitatea undelor de lumină cu ajutorul fenomenului de polarizare?
6. Ce reprezintă polarizatorul și analizorul? Este vreo deosebire constructivă între acestea?
7. Formulaţi legea lui Brewster. Ce condiţie satisfac unghiul Brewster și cel de refracţie?
8. Determinaţi unghiul de polarizare totală la reflexia luminii pe o placă de sticlă cu indicele de refracţie $n_2 = 1{,}515$, dacă raza incidentă se propagă prin apă. Indicele de refracţie al apei este $n_1 = 1{,}333$.

# 3.10.* ÎMPRĂȘTIEREA LUMINII

La interacţiunea undelor de lumină cu substanţa, sarcinile electrice din atomii și moleculele acesteia vor efectua sub acţiunea câmpului electric variabil $\vec{E}$ al undei electromagnetice oscilaţii forţate cu aceeași frecvenţă ca și vectorul $\vec{E}$. De aceea particulele încărcate ale substanţei devin centre de unde sferice secundare care se propagă în direcţii arbitrare. Astfel, o parte din energia undei de lumină este absorbită de către substanţă, iar mai apoi emisă de către particulele ei, fiind împrăștiată în toate direcţiile posibile.

Împrăștierea luminii se mai produce și în cazul reflexiei și refracţiei luminii pe marginile particulelor de dimensiuni foarte mici (comparabile cu lungimea de undă) din mediul prin care ea se propagă. Dacă însă mediul transparent este omogen, fenomenul de împrăștiere a luminii practic nu se observă. Aceasta se explică prin faptul că undele secundare coerente emise de particulele încărcate ale mediului interferă, iar ca rezultat se neutralizează reciproc în toate direcţiile, în afară de direcţia de propagare a luminii transmise.

Efectele împrăștierii luminii pot fi observate cu ajutorul unei experienţe simple. Într-o cuvă de sticlă de formă alungită plină cu apă introducem câteva picături de lapte și direcţionăm prin acest mediu un flux îngust de lumină. Privind lateral, vom observa lumina împrăștiată de o culoare cu nuanţă mai albăstrie decât a sursei de lumină, iar lumina care traversează cuva de-a lungul ei va avea o culoare de nuanţă roșiatică. Aceasta se explică prin faptul că undele de lumină cu diferite lungimi de undă sunt împrăștiate în mod diferit. După cum a demonstrat fizicianul și matematicianul englez John William Strutt (lordul Rayleigh) (1842–1919), intensitatea luminii împrăștiate este invers proporţională cu lungimea de undă la puterea a patra

$$I = \frac{C}{\lambda^4}. \qquad (3.32)$$

Din (3.32) rezultă că undele de lumină din spectrul vizibil cu lungimi de undă mai mici sunt împrăștiate mai puternic decât cele cu lungimi de undă mai mari.

*Împrăștierea Rayleigh* are loc atunci când lumina trece prin medii solide sau lichide transparente, însă cel mai bine se observă în gaze. Datorită împrăștierii Rayleigh a luminii solare pe moleculele atmosferei terestre, cerul este văzut albastru. Într-adevăr, razele din partea roșie a spectrului luminii solare, fiind împrăștiate mai puţin, ajung la Pământ și sunt absorbite, iar cele din partea albastră se acumulează în atmosferă datorită împrăștierii puternice, dând cerului culoarea albastră.

Împrăștierea Rayleigh explică și culoarea discului solar. La amiază, lumina albă care vine de la Soare, datorită împrăștierii, pierde în atmosfera terestră o parte din razele ei violete și albastre, iar discul solar se vede de culoare galbenă-aurie. La răsăritul și apusul Soarelui, când drumul parcurs de razele solare prin atmosferă este mai mare, împrăștierea razelor albastre devine și mai puternică, astfel încât discul solar pare de culoare roșie-portocalie.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Care este esenţa fenomenului de împrăștiere a luminii?
2. De ce în mediile transparente omogene nu se observă împrăștierea luminii?
3. Cum depinde intensitatea luminii împrăștiate de lungimea ei de undă?
4. Cum se explică culoarea albastră a cerului? Dar a discului solar în diferite perioade ale zilei?

Capitolul 4

# ELEMENTE DE TEORIE A RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

## 4.1.* PRINCIPIUL RELATIVITĂŢII ÎN FIZICĂ. POSTULATELE LUI EINSTEIN

### Să ne amintim

Pentru a descrie mișcarea mecanică a corpului – schimbarea poziției lui în raport cu alte corpuri –, este necesar un sistem de referință. Acesta reprezintă un sistem de coordonate, legat cu corpul de referință, în raport cu care este descrisă mișcarea. Sunt necesare, de asemenea, o riglă și un ceasornic, pentru a măsura distanțele și timpul.

**Mișcarea corpului** depinde de sistemul de referință ales, adică este **relativă** (v. manualul *Fizică, cl. X*). În cinematică este posibil de utilizat orice sistem de referință, în dinamică însă se dă preferință **sistemelor de referinţă inerţiale**.

Mișcarea mecanică a corpurilor decurge în spațiu și în timp. În mecanica clasică **spațiul și timpul sunt considerate absolute, independente unul față de altul și față de corpurile care se află și se mișcă în ele**. Distanța dintre două puncte (lungimea segmentului) și intervalul de timp dintre două evenimente în sisteme de referință diferite sunt aceleași.

Un rol deosebit în mecanica clasică revine **transformărilor lui Galilei** și **principiului relativității al lui Galilei** (v. manualul *Fizică, cl. X*).

Fie un **sistem de referinţă inerţial** $S$, considerat convenţional imobil, a cărui parte componentă este sistemul de coordonate $Oxyz$ și un al doilea sistem de referință $S'$ din care face parte sistemul de coordonate $O'x'y'z'$. Admitem că sistemul $S'$ se mișcă, în raport cu sistemul $S$, având o ***viteză constantă*** $\vec{u}$ paralelă cu axa $Ox$ și că la momentul inițial de timp $t_0 = t_0' = 0$, comun pentru ambele sisteme de referință, axele coordonatelor respective ale sistemelor coincid. La această mișcare axa $O'x'$ alunecă pe axa $Ox$, axa $O'y'$ rămânând paralelă cu $Oy$, iar $O'z'$ – paralelă cu $Oz$ (*fig. 4.1*). Mișcarea sistemului $S'$ este o mișcare de translație.

Se consideră punctul material $M$, care la momentul de timp $t$ ocupă în sistemul de referință $S$ poziția determinată de vectorul de poziţie $\vec{r}$. Vectorul de poziție al punctului $M$ în raport cu sistemul $S'$ este $\vec{r}'$, iar momentul de timp – $t'$. Originea timpului în $S$ și $S'$ este aceeași: $t_0 = t_0' = 0$.

Ţinând seama de faptul că viteza $\vec{u}$ este constantă și că la momentul $t = 0$ originile $O'$ și $O$ coincideau, distanța $OO' = ut$ sau sub formă vectorială $\overrightarrow{OO'} = \vec{u}t$, se obține (*fig. 4.1*):

$$x = x' + ut',\ y = y',\ z = z',\ t = t', \tag{4.1}$$

sau sub formă vectorială

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t',\ t = t'. \tag{4.2}$$

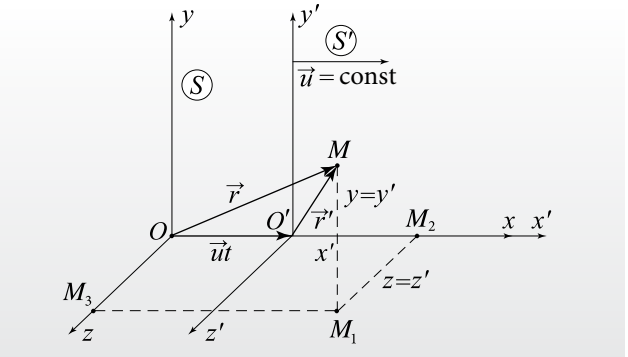



*Fig. 4.1*

Relaţiile (4.1) sau (4.2) sunt numite *transformările lui Galilei*.

Din (4.2) obţinem pentru vitezele $\vec{v}$ şi $\vec{v}'$ în raport cu cele două sisteme de referinţă relaţiile următoare:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u} \text{ sau } \vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}. \quad (4.3)$$

Aceasta reprezintă ***legea clasică a compunerii vitezelor***, conform căreia **viteza este o mărime relativă**, diferită în sistemele *S* şi *S′*.

Dacă $\vec{u}$ = const., din (4.3) rezultă:

$$\vec{a} = \vec{a}', \quad (4.4)$$

adică acceleraţiile punctului material în raport cu sistemele de referinţă *S* şi *S′* sunt egale între ele.

În baza relaţiei (4.4) se demonstrează că orice sistem de referinţă aflat în mişcare de translaţie cu viteză constantă în raport cu un sistem inerţial este, de asemenea, un sistem de referinţă inerţial.

În conformitate cu relaţia (4.4), acceleraţia nu se modifică la trecerea de la un sistem de referinţă inerţial la altul.

**Mărimile fizice sau relaţiile dintre ele care nu se modifică la trecerea de la un sistem de referinţă inerţial la altul sunt numite *invariante***. Trecerea se efectuează conform transformărilor lui Galilei, de aceea se concretizează că aceste mărimi sunt **invariante în raport cu transformările lui Galilei**.

Ţinând seama că masa corpului *m* este o mărime constantă, aceeaşi în *S* şi *S′*, rezultă că:

**principiile mecanicii clasice (newtoniene) sunt invariante în raport cu transformările lui Galilei, adică se formulează la fel în toate sistemele de referinţă inerţiale. Cu alte cuvinte, mişcarea rectilinie uniformă a sistemului inerţial nu influenţează fenomenele mecanice care se produc în el.**

Aceste afirmaţii prezintă formulări echivalente ale ***principiului relativităţii al lui Galilei – principiul relativităţii în mecanica clasică.***

Conform acestui principiu, prin experimente mecanice nu se poate stabili dacă sistemul inerţial se mişcă, cu atât mai mult, nu poate fi determinată viteza acestuia.

Să examinăm problema relativităţii în electrodinamică. Un rezultat important în domeniul electromagnetismului îl constituie **teoria câmpului electromagnetic** – electrodinamica – elaborată de către Maxwell în anii 1860–1865. La temelia ei se află un sistem de patru ecuaţii, cunoscute în prezent sub denumirea de **ecuaţiile lui Maxwell.**

Pe fizicieni a început să-i preocupe problema valabilităţii ecuaţiilor electrodinamicii lui Maxwell pentru mediile aflate în mişcare, adică în sisteme inerţiale de referinţă mobile. S-a constatat că **ecuaţiile lui Maxwell nu sunt invariante în raport cu transformările lui Galilei**, adică îşi modifică forma la trecerea de la sistemul de referinţă inerţial, considerat imobil, la cel care se mişcă cu viteză constantă în raport cu primul.

Astfel, în fizică s-a creat o situaţie de incertitudine: pe de o parte, legile mecanicii sunt aceleaşi în toate sistemele de referinţă inerţiale, iar pe de altă parte, legităţile electrodinamicii sunt diferite în diverse sisteme inerţiale.

Această situaţie controversată a fost soluţionată în 1905 de către A. Einstein în baza a două postulate.

**Postulatul întâi** vizează extinderea principiului relativităţii al lui Galilei asupra tuturor fenomenelor fizice, inclusiv asupra celor electromagnetice:

> Legile fizicii se formulează la fel în toate sistemele de referinţă inerţiale.

Acesta este ***principiul relativităţii al lui Einstein.***

Conform lui, prin niciun experiment fizic realizat în sistemul inerţial nu poate fi stabilit dacă el se mişcă rectiliniu şi uniform, iar viteza acestei mişcări nu poate fi determinată.

**Postulatul al doilea** se referă la viteza luminii în vid:

> Viteza luminii în vid are aceeaşi valoare în toate sistemele de referinţă inerţiale şi nu depinde de viteza sursei de lumină sau a observatorului.

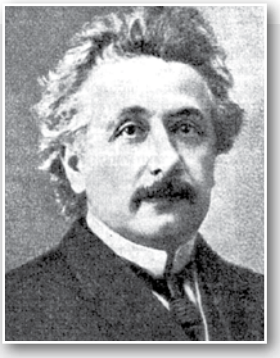
Acest postulat mai este numit **postulatul invarianţei vitezei luminii** şi relevă rolul deosebit al vitezei luminii în vid *c*, care este limita superioară a vitezei corpurilor, a semnalelor şi a interacţiunilor în natură.

Un argument în favoarea postulatului al doilea au servit rezultatele experimentelor realizate în 1881 de către fizicianul şi astronomul american Albert

Abraham Michelson (1852–1931), apoi în 1887, într-o variantă perfecţionată, împreună cu Edward Williams Morley (1838–1923). În aceste experimente s-a demonstrat convingător că propagarea luminii nu este influenţată de mişcarea Pământului, viteza luminii fiind aceeaşi în toate direcţiile în raport cu viteza Pământului.

Postulatul al doilea nu este în concordanţă cu legea compunerii vitezelor din mecanica newtoniană – viteza sursei sau a observatorului nu se adună şi nu se scade din viteza luminii în vid. Prin urmare, transformările lui Galilei nu corespund postulatului al doilea, necesitând a fi înlocuite cu altele. Deoarece ele au fost stabilite în baza concepţiei de spaţiu şi timp absolut, aceste concepte trebuie revizuite.

Teoria elaborată de Einstein, conform acestor două postulate, a fost numită **teoria relativităţii restrânse** şi se aplică numai la sisteme de referinţă inerţiale. Viteza luminii în vid $c$ este numită **constantă relativistă**. Teoria care studiază fenomenele fizice în sistemele de referinţă neinerţiale, precum şi fenomenele gravitaţionale, se numeşte **teoria relativităţii generale** (Einstein, 1916).



ALBERT EINSTEIN
(1879–1955)
*fizician german*

A explicat efectul fotoelectric în baza teoriei cuantice, susţinând existenţa unui purtător material al cuantei de energie – un corpuscul denumit ulterior „foton". Este fondatorul teoriei cinetico-moleculare a mişcării browniene. În lucrarea *Asupra electrodinamicii corpurilor în mişcare* a expus teoria relativităţii restrânse.
A formulat teoria căldurilor specifice ale solidelor (a. 1907) şi teoria relativităţii generale (a. 1916), care extinde teoria relativităţii pentru sistemele de referinţă neinerţiale. A enunţat legile proceselor de emisie şi de absorbţie a luminii, a prezis existenţa emisiei stimulate a luminii (a. 1917), în baza ideilor sale ulterior fiind construit laserul.
În anul 1921 i s-a decernat Premiul Nobel pentru explicarea legilor efectului fotoelectric.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Cum veţi stabili dacă un sistem de referinţă este inerţial sau nu?
2. Ce mărimi fizice invariante faţă de transformările lui Galilei cunoaşteţi?
3. În ce constă echivalenţa tuturor sistemelor de referinţă inerţiale conform principiului relativităţii al lui Galilei? Dar conform principiului relativităţii al lui Einstein?
4. Concordaţi postulatul despre invarianta vitezei luminii în vid cu legea compunerii vitezelor din mecanica clasică. Argumentaţi răspunsul.

## 4.2.* SPAŢIUL ŞI TIMPUL ÎN TEORIA RELATIVITĂŢII RESTRÂNSE

### a. Relativitatea simultaneităţii

O noţiune importantă în teoria relativităţii este cea de *eveniment*. Orice fenomen fizic se produce într-o regiune a spaţiului într-un anumit interval de timp. În cazul în care regiunea spaţiului şi intervalul de timp sunt foarte mici, fenomenul este numit **eveniment**. Acesta constituie un model ideal, care admite că fenomenul are loc într-un punct al spaţiului şi la un moment de timp.

**Evenimentele care se produc în acelaşi timp se numesc *simultane*.**

Să analizăm noţiunea de simultaneitate în cadrul teoriei relativităţii restrânse în baza unui experiment mental.

Se consideră două sisteme de coordonate: sistemul $Oxyz$, fiind imobil, şi sistemul $O'x'y'z'$, care sunt părţi componente ale sistemelor de referinţă inerţiale $S$ şi $S'$. Admitem că sistemul $O'x'y'z'$ se mişcă în raport cu sistemul $Oxyz$ cu viteza constantă $\vec{u}$, paralelă cu axa $Ox$ şi că la un moment iniţial de timp, comun pentru ambele sisteme, axele acestora coincid. În timpul mişcării axa $O'x'$ alunecă pe axa $Ox$, axa $O'y'$ rămâne paralelă cu $Oy$

și $O'z'$ – paralelă cu $Oz$ (*fig. 4.2*). Ulterior se vor avea în vedere anume asemenea sisteme de referinţă inerţiale.

Considerăm în sistemul $S'$ o tijă $AD$ paralelă cu axa $O'x'$, deci și cu $Ox$. În sistemul $S'$ tija se află în repaus și se mișcă în raport cu sistemul $S$ cu viteza constantă $\vec{u}$ orientată de-a lungul ei. La mijlocul tijei se află un becușor de incandescenţă $B$, care se mișcă împreună cu ea (*fig. 4.2, a*).

Se presupune că la un moment becușorul $B$ se aprinde pentru un interval foarte scurt de timp și emite un impuls de lumină. Conform postulatului al doilea al lui Einstein, lumina se propagă în toate direcţiile cu aceeași viteză $c$ în raport cu ambele sisteme de referinţă. În calitate de evenimente $a$ și $d$ se consideră ajungerea luminii la capetele $A$ și $D$ ale tijei. Evenimentele $a$ și $d$ se produc în puncte diferite ale spaţiului, adică sunt **separate spaţial**.

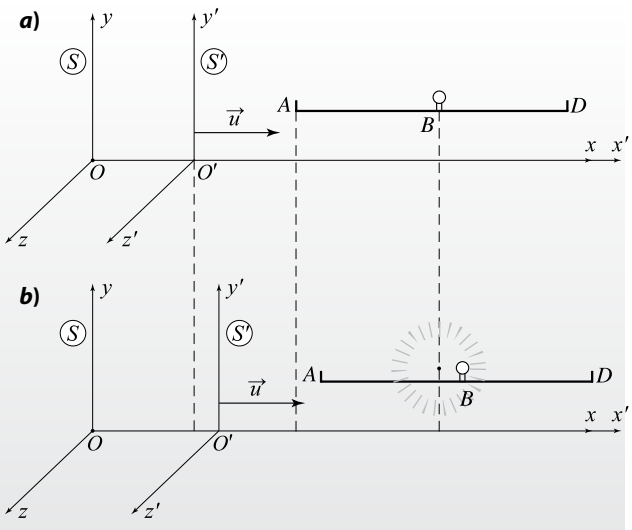



*Fig. 4.2*

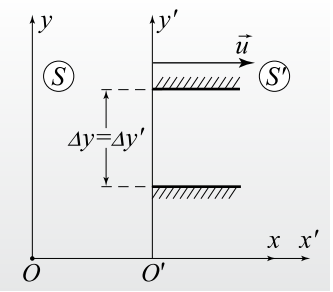



*Fig. 4.3*

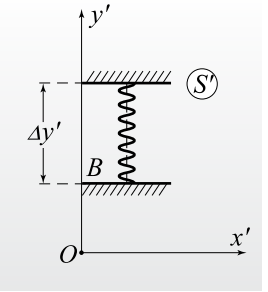



*Fig. 4.4*

Să analizăm evenimentele $a$ și $d$ din punctul de vedere al observatorului aflat în repaus în sistemul $S'$. Becușorul se află la mijlocul tijei în repaus, iar lumina parcurge până la capetele ei distanţe egale. Viteza de propagare în ambele sensuri este aceeași, de aceea intervalele de timp în care lumina parcurge distanţele până la capetele tijei sunt egale. Prin urmare, în sistemul de referinţă inerţial $S'$ **evenimentele** $a$ și $d$ se produc la același moment de timp, adică sunt **simultane**.

Să considerăm evenimentele $a$ și $d$ din punctul de vedere al observatorului, care se află în repaus în sistemul inerţial $S$. În raport cu acest sistem tija se deplasează cu viteza $\vec{u}$, astfel încât capătul $A$ se apropie de poziţia în care becușorul a emis impulsul de lumină, iar capătul $D$ se îndepărtează de această poziţie (*fig. 4.2, b*). Deoarece viteza luminii în ambele sensuri este aceeași, intervalul de timp în care lumina ajunge la capătul $A$ al tijei este mai mic decât cel în care ea ajunge la capătul $D$. Deci pentru observatorul din sistemul inerţial $S$ evenimentul $a$ se produce înaintea evenimentului $d$ și aceste **evenimente nu sunt simultane**. Exemplul respectiv demonstrează că:

> **evenimentele separate spaţial și simultane într-un sistem de referinţă inerţial nu sunt simultane în alte sisteme inerţiale, adică *simultaneitatea este relativă*.**

Concluzia privind caracterul relativ al **simultaneităţii** evenimentelor denotă că în teoria relativităţii **timpul nu este absolut**.

## b. Relativitatea intervalelor de timp

Pentru a stabili relaţia dintre intervalele de timp în diferite sisteme de referinţă inerţiale, se consideră cele două sisteme inerţiale $S$ și $S'$, sistemul $S$ fiind imobil, iar sistemul $S'$ mișcându-se în raport cu sistemul $S$ cu viteza constantă $\vec{u}$, paralelă cu axa $Ox$.

Admitem că în sistemul $S'$ se află fixat un ceasornic de construcţie specială: două oglinzi cu feţele reflectoare una spre alta, paralele atât între ele, cât și cu planul de coordonate $O'x'z'$ (*fig. 4.3*). În figură nu sunt reprezentate axele $Oz$ și $O'z'$ perpendiculare pe planul ei. Printr-o modalitate anumită, dintr-un punct al feţei unei oglinzi, este emis un impuls de lumină de scurtă durată.

Să analizăm funcţionarea ceasornicului în sistemul $S'$, în care el se află în repaus. Impulsul de lumină, ce cade perpendicular pe oglinda superioară, se reflectă

spre oglinda inferioară, de la care se reflectă spre cea superioară etc. (*fig. 4.4*). Impulsul efectuează o mişcare periodică între oglinzi similară unui pendul. Notăm cu $\tau'$ perioada de „oscilaţie" a impulsului de lumină în raport cu observatorul din $S'$. În acest interval de timp, lumina parcurge cu viteza $c$ distanţa $\Delta y'$ dintre oglinzi de două ori. Prin urmare, $\tau' = \frac{2 \cdot \Delta y'}{c}$, de unde rezultă că:

$$\Delta y' = \frac{1}{2} c \tau'. \qquad (4.5)$$

Să cercetăm funcţionarea acestui ceasornic din punctul de vedere al observatorului aflat în sistemul $S$, în raport cu care ceasornicul se mişcă cu viteza constantă $\vec{u}$, paralelă cu axa $Ox$ şi cu oglinzile. Notăm cu $\tau$ intervalul de timp în care lumina se propagă de la oglinda inferioară până la cea superioară şi înapoi. Ţinem seama de faptul că în timpul $\tau/2$ în care lumina se propagă de la oglinda inferioară până la cea superioară, ceasornicul se deplasează în direcţia axei $Ox$ la o distanţă egală cu $u\tau/2$. În *figura 4.5* sunt reprezentate trei poziţii succesive ale ceasornicului corespunzătoare momentelor de timp în care lumina ajunge de fiecare dată la oglinda următoare, parcurgând în timpul $\tau/2$ distanţa $c\tau/2$. După cum se vede din figură, pătratul distanţei dintre oglinzi este:

$$(\Delta y)^2 = \left(c\frac{\tau}{2}\right)^2 - \left(u\frac{\tau}{2}\right)^2,$$

de unde rezultă:

$$\Delta y = \frac{1}{2}\tau\sqrt{c^2 - u^2}. \qquad (4.6)$$

Dimensiunile transversale (în direcţii perpendiculare pe viteza $u$) nu se modifică la trecerea de la un sistem inerţial la altul, adică $\Delta y = \Delta y'$. Egalând expresiile din partea dreaptă a relaţiilor (4.5) şi (4.6), obţinem:

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \qquad (4.7)$$

Acest rezultat arată că **intervalul de timp dintre două evenimente este relativ**, luând valori diferite în sisteme inerţiale diverse. Evident, $\tau' < \tau$, adică intervalul de timp este minim în sistemul de referinţă $S'$, faţă de care locul unde se produc evenimentele este fix. Altfel spus, pentru observatorul faţă de care evenimentele se produc în acelaşi punct – după fiecare perioadă $\tau'$ impulsul de lumină se întoarce în punctul de la care a plecat. În raport cu sistemul de referinţă $S$, considerat fix, aceste două evenimente se produc însă în puncte diferite ale spaţiului.

Astfel,

> intervalul de timp dintre două evenimente este minim în sistemul de referinţă în raport cu care ele se produc în acelaşi punct.

Pentru observatorul faţă de care locul unde se produc evenimentele se mişcă, intervalul de timp $\tau$ dintre aceleaşi evenimente este mai mare, timpul decurge mai lent şi are loc **dilatarea duratei**, adică **încetinirea timpului**. Această încetinire este proprie tuturor proceselor care au loc în sistemul $S'$, inclusiv celor din organismele vii.

## c. Relativitatea dimensiunilor longitudinale

Mai sus s-a menţionat că dimensiunile transversale ale corpurilor, adică perpendiculare pe viteza mişcării, rămân aceleaşi la trecerea de la un sistem de referinţă inerţial la altul. Pentru a determina care este situaţia în cazul dimensiunilor longitudinale, să analizăm un alt experiment mental.

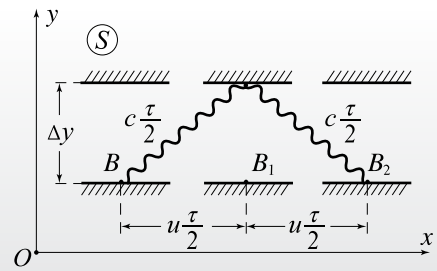



*Fig. 4.5*

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

Existența reală a încetinirii timpului a fost confirmată experimental prin observări din lumea particulelor elementare. În natură există o particulă elementară numită *miuon*, a cărei masă este de aproximativ 207 ori mai mare decât cea a electronului. Ea este nestabilă și are, în sistemul de referință în raport cu care se află în repaus, un timp mediu de viață de circa $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s (după acest timp ea se transformă în alte particule elementare). Dacă miuonul s-ar fi mișcat cu viteză egală aproximativ cu viteza luminii în vid ($3 \cdot 10^8$ m/s), în acest timp ar fi parcurs o distanță de circa 660 m. S-a constatat că miuonii apar și în straturile superioare ale atmosferei sub acțiunea radiației cosmice, care permanent bombardează Pământul. Miuonii parcurg până la suprafața Pământului distanțe egale cu grosimea atmosferei, adică distanțe de zeci de kilometri, mult mai mari decât distanța calculată mai sus. Faptul în cauză poate fi explicat numai dacă luăm în considerare încetinirea timpului; durata medie de viață a miuonilor în sistemul de referință legat cu Pământul, în raport cu care ei se mișcă cu viteze mari, este mult mai mare decât $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s, în acest timp ei parcurgând distanțe de zeci de kilometri.

Să ne imaginăm din nou cele două sisteme de referinţă inerţiale, $S$ şi $S'$, unde sistemul $S$ este considerat imobil, iar sistemul $S'$ se mişcă în raport cu sistemul $S$ cu viteza constantă $\vec{u}$, paralelă cu axele $Ox$ şi $O'x'$. Admitem că în sistemul $S'$ este fixată o riglă rigidă $BD$, paralelă cu axa $O'x'$. La capătul $B$ al riglei este fixat un becuşor electric, iar la capătul $D$ – o oglindă mică, planul reflector al căreia este perpendicular pe axa $O'x'$ şi reflectă spre becul $B$ lumina emisă de acesta (*fig. 4.6*).

Notăm cu $l$ lungimea riglei măsurată de observatorul din sistemul imobil $S$ şi cu $l'$ lungimea riglei măsurată de observatorul din sistemul $S'$, în raport cu care rigla este în repaus. Fie că la un anumit moment becuşorul $B$ emite un impuls de lumină de scurtă durată. Să determinăm intervalele de timp $\tau$ şi $\tau'$ în care impulsul de lumină se propagă de la becuşor până la oglinda $D$ şi înapoi, în raport cu sistemele $S$ şi $S'$. Vom ţine seama de postulatul al doilea al lui Einstein.

În raport cu observatorul din $S'$ rigla este în repaus şi impulsul de lumină parcurge distanţa $2l'$ în intervalul de timp:

$$\tau' = \frac{2l'}{c}. \qquad (4.8)$$

Să calculăm intervalul de timp respectiv $\tau$ în raport cu sistemul de referinţă imobil $S$. Notăm cu $\tau_1$ intervalul de timp în care impulsul de lumină parcurge distanţa de la bec până la oglindă şi cu $\tau_2$ timpul în care impulsul parcurge distanţa de la oglindă până la bec. Timpul căutat $\tau = \tau_1 + \tau_2$. În intervalul de timp $\tau_1$ lumina parcurge distanţa $c\tau_1$, egală cu lungimea riglei $l$ plus distanţa $u\tau_1$ pe care a parcurs-o rigla în acest interval de timp (în *figura 4.7* sunt reprezentate poziţiile $a$ şi $b$ ale riglei la începutul şi la sfârşitul intervalului). Avem $c\tau_1 = l + u\tau_1$, deci

$$\tau_1 = \frac{l}{c-u}.$$

În intervalul $\tau_2$ lumina parcurge distanţa $c\tau_2$, egală cu lungimea riglei $l$ minus distanţa $u\tau_2$ parcursă de bec în întâmpinarea luminii (în *figura 4.7* poziţia $b$ a riglei corespunde începutului acestui interval, iar poziţia $c$ momentului de timp la care lumina ajunge la bec). Prin urmare,

$$c\tau_2 = l - u\tau_2, \text{ deci } \tau_2 = \frac{l}{c+u}.$$

Pentru intervalul de timp $\tau$ obţinem:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{l}{c-u} + \frac{l}{c+u} = \frac{2lc}{c^2-u^2} = \frac{2l}{c\left(1-u^2/c^2\right)}. \qquad (4.9)$$

Intervalele de timp $\tau$ şi $\tau'$ satisfac relaţia (4.7), din care rezultă relaţia dintre lungimile riglei $l$ şi $l'$ în sistemele de referinţă inerţiale $S$ şi $S'$:

$$l = l'\sqrt{1-u^2/c^2}. \qquad (4.10)$$

Acest rezultat denotă că **dimensiunile longitudinale sunt relative**, ele modificându-se la trecerea de la un sistem de referinţă inerţial la altul.

Din relaţia (4.10) reiese că $l < l'$, adică lungimea riglei, deci orice dimensiune longitudinală, are valoarea cea mai mare în sistemul de referinţă în raport cu care ea se află în repaus. Această valoare $l'$ este numită, de obicei, **lungime proprie**.

> Dimensiunile longitudinale ale corpurilor în sistemele de referinţă, în raport cu care ele se mişcă, sunt mai mici decât dimensiunile proprii. Fenomenul dat se numeşte **contracţia lungimilor**.

Acest rezultat, precum şi cel referitor la intervalele de timp, se află în acord complet cu postulatul întâi al lui Einstein.

Rezumând cele expuse, conchidem că

> în teoria relativităţii restrânse spaţiul şi timpul nu mai sunt absolute: intervalele de timp şi dimensiunile corpurilor se modifică la trecerea de la un sistem de referinţă inerţial la altul.

Relaţiile cantitative (4.7) şi (4.10) conţin expresia $\sqrt{1-u^2/c^2}$, ceea ce indică faptul că relativitatea

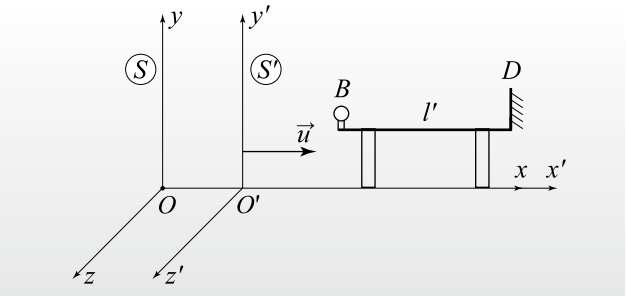



*Fig. 4.6*

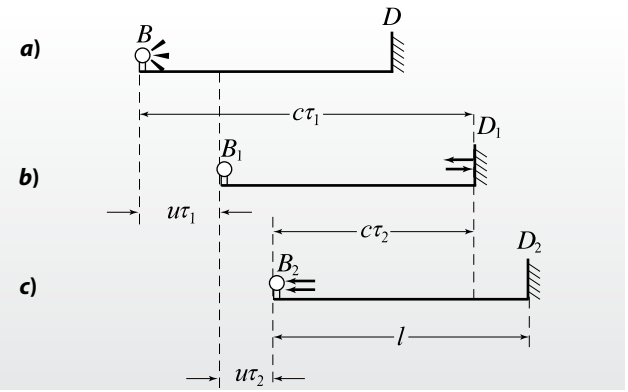



*Fig. 4.7*

menţionată se manifestă la viteze $u$, care iau valori comparabile cu viteza luminii în vid $c$. Efectele care au loc la astfel de viteze sunt numite **relativiste**.

La viteze mici $u \ll c$ din relaţiile (4.7) şi (4.10) rezultă, cu un grad înalt de precizie, că $\tau = \tau'$ şi $l = l'$, deci la viteze mici spaţiul şi timpul pot fi considerate absolute, adică sunt valabile legile mecanicii newtoniene.

Mărimile fizice, precum intervalul de timp şi lungimea sunt mărimi reale, deci expresia de sub radicalul $\sqrt{1-u^2/c^2}$ nu poate fi negativă, adică viteza $u$ poate lua doar valori care nu depăşesc viteza luminii în vid $c$. Rezultă că **viteza $c$, este viteza limită de transmitere a interacţiunilor în natură şi de mişcare a corpurilor**.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care este semnificaţia fizică a noţiunii de *eveniment*?
2. În experimentul mental, reprezentat în *figura 4.2*, observatorul din sistemul de referinţă $S$ constată că lumina emisă de becuşorul $B$ ajunge mai întâi la capătul $A$ al tijei, apoi la capătul $D$. Considerăm că sistemul $S'$ se mişcă în raport cu sistemul $S$ cu viteza $(-\vec{u})$. Ce constată în acest caz observatorul din sistemul $S$?
3. În ce constă încetinirea timpului?
4. Care dimensiuni ale corpului sunt numite longitudinale şi care transversale? Care din aceste dimensiuni sunt aceleaşi în diferite sisteme de referinţă inerţiale?
5. Lungimea unei tije în repaus este egală cu 25 cm. Ce lungime are tija în sistemul de referinţă, în raport cu care ea se mişcă cu viteza $u = 0{,}6\,c$, orientată de-a lungul său? ($c$ este viteza luminii în vid.)
6. În sistemul de referinţă mobil, în raport cu care se află în repaus, un romb are diagonalele egale cu 15 şi 9 cm. În ce direcţie şi cu ce viteză trebuie să se mişte rombul astfel ca pentru observatorul aflat în repaus acesta să reprezinte un pătrat?

## 4.3.* TRANSFORMĂRILE LUI LORENTZ ŞI CONSECINŢELE ACESTORA

### a. Transformările lui Lorentz

Rezultatele obţinute în tema precedentă permit a stabili relaţiile dintre coordonatele locului şi timpul unui eveniment $(x, y, z, t)$ în sistemul de referinţă inerţial $S$, cunoscând mărimile respective $(x', y', z', t')$ ale aceluiaşi eveniment în sistemul inerţial $S'$ (*fig. 4.8*). Sistemele $S$ şi $S'$ sunt definite: sistemul $S'$ se mişcă faţă de sistemul inerţial $S$, considerat imobil, cu viteză constantă $\vec{u}$, paralelă cu axa $Ox$, iar la momentul iniţial de timp originea lui $O'$ coincide cu originea $O$.

Coordonatele $y'$ şi $z'$ sunt dimensiuni transversale, care, după cum s-a menţionat, sunt aceleaşi în ambele sisteme de referinţă, adică $y = y'$ şi $z = z'$.

Segmentul $O'M_2$ în sistemul de referinţă $S'$ are lungimea $x'$. Lungimea acestui segment în sistemul $S$ are, potrivit formulei (4.10), valoarea egală cu $x'\sqrt{1-u^2/c^2}$. Astfel, după cum se vede din *figura 4.8*, pentru coordonata $x$ putem scrie:

$$x = ut + x'\sqrt{1-u^2/c^2}, \qquad (4.11)$$

de unde rezultă:

$$x' = \frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \qquad (4.12)$$

Această formulă permite a calcula coordonata $x'$ în sistemul $S'$, fiind cunoscută coordonata $x$ şi timpul $t$ în sistemul $S$.

Să obţinem relaţia inversă, adică expresia pentru coordonata $x$. Dacă considerăm sistemul $S'$ imobil, atunci sistemul $S$ se mişcă în raport cu el cu viteza $(-\vec{u})$. Coordonata $x$ se obţine din formula (4.12), înlocuind mărimile $x$, $t$ cu $x'$, $t'$ şi invers, precum şi schimbând în opus semnul vitezei $u$. Obţinem:

$$x = \frac{x'+ut'}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \qquad (4.13)$$

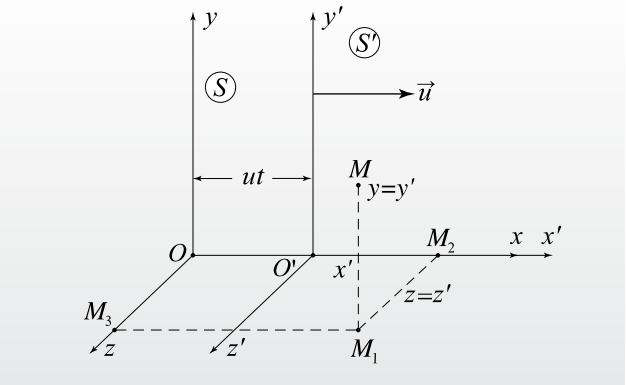



*Fig. 4.8*

Egalând expresiile din partea dreaptă a formulelor (4.11) și (4.13), pentru timpul $t$ în sistemul imobil $S$ avem:

$$t = \frac{t' + \frac{x'u}{c^2}}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \qquad (4.14)$$

Totalizăm rezultatele obținute:

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + x'u/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \qquad (4.15)$$

Aceste relații au fost numite **transformările lui Lorentz**. Ele au fost deduse în anul 1904, înainte de publicarea lucrării lui Einstein, ca relații ce nu modifică ecuațiile electrodinamicii la trecerea de la un sistem de referință inerțial la alt sistem inerțial.

Ecuațiile fundamentale ale electrodinamicii (ecuațiile lui Maxwell) sunt invariante în raport cu transformările lui Lorentz.

Acest fapt este în conformitate cu primul postulat al lui Einstein. Din formulele (4.15) observăm că în teoria relativității restrânse spațiul și timpul nu sunt independente.

La viteze $u$ mult mai mici decât viteza luminii în vid $c$, adică la $u << c$, termenii care conțin raportul $u/c$ pot fi neglijați și transformările lui Lorentz (4.15) trec în transformările lui Galilei (4.1). Astfel, a fost stabilită limita aplicabilității transformărilor lui Galilei, a conceptelor și a legilor mecanicii clasice: viteze mult mai mici decât viteza luminii în vid.

Legea fundamentală a mecanicii clasice (newtoniene) este invariantă în raport cu transformările lui Galilei (4.1), deci nu este invariantă în raport cu transformările lui Lorentz. Rezultă că în domeniul relativist, când vitezele obiectelor devin comparabile cu viteza luminii în vid $c$, în mecanică sunt valabile alte legități, care la viteze $u << c$ trec în legitățile mecanicii clasice.

## b. Compunerea relativistă a vitezelor

Să stabilim relația dintre vitezele punctului material în raport cu cele două sisteme de referință inerțiale, $S$ și $S'$. Vitezele se exprimă prin coordonatele și timpul din sistemele respective. Astfel, în sistemele $S$ și $S'$ proiecțiile vitezei pe axele $Ox$ și $O'x'$ sunt:

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad \text{și} \quad v'_x = \frac{dx'}{dt'}.$$

Ținând seama de faptul că viteza $u$ este constantă, din relațiile (4.15) avem:

$$dx = \frac{dx' + u\,dt'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad dt = \frac{dt' + dx' \cdot u/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \qquad (4.16)$$

Facem raportul respectiv:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + u\,dt'}{dt' + dx' \cdot u/c^2}.$$

Împărțind numărătorul și numitorul la $dt'$ și având în vedere că $\frac{dx'}{dt'} = v'_x$, obținem relația căutată:

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + v'_x \cdot u/c^2}. \qquad (4.17)$$

Aceasta este **legea relativistă a compunerii vitezelor**.

În mod similar pot fi obținute expresiile pentru $v_y$ și $v_z$.

Să analizăm câteva exemple.

Fie că în sistemul $S'$ o rază de lumină se propagă în sensul pozitiv al axei $O'x'$, adică viteza $v'_x = c$. Viteza de propagare a acestei raze de lumină în raport cu sistemul $S$ este: $v_x = \frac{c + u}{1 + c \cdot u/c^2} = c$, ceea ce corespunde principiului al doilea al lui Einstein.

Admitem că o particulă elementară se propagă în raport cu sistemul $S'$ cu viteza $v'_x = 0{,}9\,c$, iar viteza sistemului $S'$ în raport cu $S$ este $u = 0{,}8\,c$. Substituind aceste valori în legea (4.17), pentru viteza particulei în raport cu sistemul imobil $S$ obținem $v_x \approx 0{,}988\,c$. Înlocuind aceleași valori pentru $v'_x$ și $u$ în legea clasică a compunerii vitezelor (4.3), avem $v_x = v'_x + u = 1{,}7\,c$, valoare ce depășește viteza luminii în vid.

La viteze mult mai mici decât viteza luminii în vid $u << c$ relațiile relativiste trec în relațiile mecanicii clasice. În acest caz din (4.17) obținem $v_x = v'_x + u$, adică legea clasică a compunerii vitezelor (4.3).

## Verificați-vă cunoștințele

1. Un eveniment s-a produs în sistemul mobil $S'$ în punctul cu coordonatele $x' = 3 \cdot 10^4$ m, $y' = 2 \cdot 10^4$ m, $z' = 0$ la momentul de timp $t' = 7 \cdot 10^{-5}$ s. Viteza sistemului mobil în raport cu sistemul fix $S$ este egală cu $0{,}8\,c$, fiind orientată de-a lungul axei $Ox$. Determinați coordonatele evenimentului și timpul când acesta s-a produs în sistemul $S$.
2. Dintr-o navă cosmică, a cărei viteză este egală cu $0{,}6\,c$ în raport cu o stațiune radar, sunt lansați electroni cu viteza de $0{,}9\,c$ în raport cu nava, în direcția vitezei acesteia. Să se calculeze viteza electronilor în raport cu stațiunea radar după formulele: *a*) teoriei relativității restrânse; *b*) mecanicii clasice.

## 4.4.* NOŢIUNE DE DINAMICĂ RELATIVISTĂ

Majoritatea problemelor de dinamică clasică se rezolvă în baza principiului fundamental al dinamicii sub forma: $m\vec{a} = \vec{F}$. Această relaţie este în contradicţie cu al doilea postulat al teoriei relativităţii restrânse. Într-adevăr, corpul de masă $m$, asupra căruia acţionează forţa constantă $\vec{F}$, se mişcă uniform accelerat cu acceleraţia $a$ = const. Viteza corpului creşte odată cu timpul şi poate atinge valori mai mari decât viteza luminii în vid $c$, ceea ce nu concordă cu teoria relativităţii restrânse.

În mecanica clasică este cunoscută şi o altă formă a principiului fundamental al dinamicii. Dacă se introduce noţiunea de impuls al corpului

$$\vec{p} = m\vec{v}, \tag{4.18}$$

se foloseşte definiţia acceleraţiei $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ şi se ţine seama de faptul că în mecanica clasică masa corpului este constantă, se obţine legea variaţiei impulsului:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \tag{4.19}$$

În cadrul mecanicii clasice formulările $m\vec{a} = \vec{F}$ şi (4.19) sunt echivalente, dar în teoria relativităţii restrânse prima dintre ele nu este valabilă.

Einstein a stabilit că legea de bază a dinamicii relativiste este exprimată de relaţia (4.19), în care impulsul corpului este definit prin formula (4.18), dar cu o deosebire esenţială de cea din dinamica clasică:

**Masa corpului nu mai este constantă, ci dependentă de viteză**. Această dependenţă are forma:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \tag{4.20}$$

unde $m_0$ este **masa de repaus** a corpului (masa în sistemul de referinţă în care corpul se află în repaus). Masa $m$ este numită **masă relativistă**[1].

Substituind (4.20) în (4.18), obţinem expresia pentru **impulsul relativist**:

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \tag{4.21}$$

iar introducând (4.21) în (4.19), stabilim **legea fundamentală a dinamicii relativiste**:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right) = \vec{F}. \tag{4.22}$$

În baza acestei legi se demonstrează că viteza particulei cu masa de repaus $m_0$ poate fi mărită până la valori destul de apropiate de viteza luminii în vid $c$, dar ea nu poate deveni egală cu $c$, masa $m$ crescând nelimitat.

La viteze mici: $v \ll c$, neglijând termenul $v^2/c^2$ în comparaţie cu unitatea din (4.20), obţinem $m = m_0$, adică la astfel de viteze masa corpului este constantă şi legea relativistă (4.22) trece în expresia obişnuită a principiului fundamental al dinamicii clasice.

Einstein a stabilit, de asemenea, relaţia universală dintre energia totală a corpului $E$ şi masa lui $m$, **interdependenţa dintre masă şi energie**:

$$E = mc^2. \tag{4.23}$$

În cazul corpului aflat în repaus, energia lui

$$E_0 = m_0c^2 \tag{4.24}$$

este numită **energie de repaus**.

Aceste relaţii denotă faptul că **variaţiei masei $\Delta m$ îi corespunde neapărat variaţia de energie $\Delta E$, determinată de relaţia:**

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \tag{4.25}$$

Importanţa deosebită a relaţiei respective va fi ilustrată ulterior prin aplicări în fizica nucleului atomic şi a particulelor elementare.

Din formulele (4.18) şi (4.23), prin excluderea masei, obţinem o relaţie importantă dintre impulsul relativist şi energia totală:

$$\vec{p} = \frac{E}{c^2}\vec{v}. \tag{4.26}$$

Viteza corpului, energia totală şi impulsul relativist sunt mărimi relative, se modifică la trecerea de la un sistem de referinţă inerţial la altul.

Să demonstrăm însă existenţa unei mărimi absolute (invariante), aceeaşi în toate sistemele de referinţă inerţiale.

Ridicând expresia (4.20) la pătrat, obţinem:

$$m^2\left(1 - v^2/c^2\right) = m_0^2.$$

După înmulţirea la $c^4$, căpătăm:

$$m^2c^4 - c^2m^2v^2 = m_0^2c^4,$$

iar ţinând seama de relaţiile (4.23) şi (4.18), obţinem:

$$E^2 - c^2p^2 = m_0^2c^4. \tag{4.27}$$

[1] În prezent, în fizica teoretică se manifestă tendinţa de a nu se utiliza noţiunea de masă relativistă $m$, ci de a se numi masă a corpului masa lui de repaus $m_0$, una şi aceeaşi în toate sistemele de referinţă inerţiale.

Mărimea din partea dreaptă a egalității este o constantă, adică nu depinde de sistemul de referință ales. Deci mărimea din partea stângă a egalității este aceeași în orice sistem de referință inerțial și este o mărime invariantă:

$$E^2 - c^2 p^2 = inv. \qquad (4.28)$$

Să analizăm următorul caz: mișcarea cu viteza $v = c$, adică având viteza egală cu viteza luminii în vid. Din (4.26) avem $p = \frac{E}{c}$. Substituind această valoare în relația (4.27), obținem $m_0^2 c^4 = 0$, de unde rezultă $m_0 = 0$. Prin urmare, **cu viteză egală cu *c* se pot mișca doar particule având masa de repaus nulă**. Ulterior vom lua cunoștință de asemenea particule.

Să deducem **expresia relativistă pentru energia cinetică**. Particula aflată în repaus posedă energia de repaus $E_0 = m_0 c^2$, iar în mișcare – energia totală $E = mc^2$. Așadar, energia cinetică a ei este egală cu diferența acestor energii:

$$E_c = E - E_0 = (m - m_0)c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right). \qquad (4.29)$$

Să demonstrăm că la viteze mici expresia pentru energia cinetică relativistă (4.29) trece în expresia bine cunoscută $E_c = \frac{m_0 v^2}{2}$. În acest scop vom folosi formule ale calculului aproximativ:

$$\sqrt{1 \pm x} \approx 1 \pm \frac{x}{2}$$

pentru $x \ll 1$.

De justețea acestei formule aproximative ne convingem ridicând la pătrat și neglijând termenul de ordinul $x^2$, care este mult mai mic decât unitatea.

O altă formulă este

$$\frac{1}{1 \mp x} \approx 1 \pm x$$

pentru $x \ll 1$.

Aducând la numitor comun și neglijând termenul de ordinul $x^2$, ne convingem de justețea formulei.

Folosind aceste formule de calcul aproximativ, obținem:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx \frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}.$$

Substituind această valoare aproximativă în formula (4.29), avem $E_c = \frac{m_0 v^2}{2}$, ceea ce trebuia de demonstrat.

Astfel, am stabilit că la viteze $v \ll c$ formulele teoriei relativității restrânse, care sunt mai generale, trec în formulele respective ale mecanicii clasice. Cu alte cuvinte, mecanica clasică este un caz particular al mecanicii relativiste. Acest exemplu ilustrează **principiul de corespondență**, în conformitate cu care orice teorie nouă, considerată mai profundă, mai generală, cu un domeniu mai larg de aplicabilitate decât teoria veche, trebuie să o includă pe aceasta, ca un caz limită, particular.

În final menționăm o proprietate deosebită a sarcinii electrice: valoarea ei nu se modifică la trecerea de la un sistem de referință la altul, ea nu depinde de viteză. Astfel, **sarcina electrică este mărime invariantă.**

## Verificați-vă cunoștințele

1. Principiul fundamental al dinamicii clasice este exprimat de două relații echivalente: $m\vec{a} = \vec{F}$ și $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$. Care dintre acestea nu corespunde postulatelor lui Einstein? Argumentați răspunsul.
2. Impulsul relativist este mai mare sau mai mic decât impulsul aceleiași particule, calculat conform definiției din mecanica clasică? (În ambele cazuri viteza particulei ia una și aceeași valoare.)
3. Care este relația universală dintre masă și energie?
4. Cum se definește energia cinetică în cadrul teoriei relativității restrânse?
5. Care este esența principiului de corespondență?
6. Ce cantitate de cărbune, care are puterea calorică egală cu $2 \cdot 10^7$ J/kg, trebuie arsă pentru a obține o cantitate de căldură egală cu energia ce corespunde masei de repaus, egale cu 1 g?
7. Ce cantitate de apă poate fi încălzită de la 20 până la 100 °C, consumând în acest scop cantitatea de căldură egală cu energia de repaus a corpului cu masa de 1 mg? Căldura specifică a apei este egală cu 4 200 J/(kg · K).
8. La ce valoare a vitezei unei particule energia cinetică a ei este de două ori mai mare decât energia de repaus?

Capitolul 5

# ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ

## 5.1. RADIAŢIA TERMICĂ. IPOTEZA CUANTELOR

Să precizăm două noţiuni esenţiale. Prin **radiaţie electromagnetică** sau simplu **radiaţie** se subînţelege totalitatea undelor electromagnetice provenite de la anumite corpuri, iar prin **emisie** – fenomenul de „producere" a radiaţiei.

Cunoaşteţi că **lumina este de natură electromagnetică** – undele de lumină sunt cele electromagnetice care, nimerind în ochiul uman, produc senzaţie vizuală.

***Sursele de lumină*** sunt corpurile care produc lumină, adică emit unde electromagnetice. Corpurile, la rândul lor, sunt formate din atomi, deci ei de fapt emit aceste unde. Evidenţiind trăsăturile generale ale fenomenului de emisie, se va ţine seama de faptul că undele electromagnetice transportă energie. În calitate de exemplu serveşte transmiterea căldurii prin radiaţie (acest fenomen l-aţi studiat în clasa a VIII-a) de la Soare spre Pământ etc. Prin urmare, atomul, emiţând unde electromagnetice, le cedează energie, micşorându-şi cu valoarea respectivă energia, conform legii conservării şi transformării energiei.

În stare stabilă, numită, de regulă, **stare fundamentală**, energia atomului este minimă. Atomul poate să emită energie, dacă în prealabil a primit din exterior o cantitate de energie şi a trecut din starea fundamentală într-o stare cu energie mai mare. Astfel de stări ale atomului sunt numite **stări excitate**, iar procesul de trecere în ele – **excitare a atomului**. Atomul excitat nu este stabil. El emite unde electromagnetice care transportă surplusul de energie primit de atom la excitare şi trece în stare cu energie mai mică.

Există mai multe modalităţi de excitare a atomilor, deci şi tipuri de radiaţii.

**Radiaţia emisă de atomii excitaţi pe seama surselor exterioare de energie (cu excepţia încălzirii) este numită *radiaţie luminescentă*.**

**Radiaţia emisă de corp pe seama energiei sale interne este numită *radiaţie termică*.**

Să analizăm fenomenul de emisie a radiaţiei termice pornind de la faptul că atomii (moleculele) corpului se află în mişcare termică continuă. Vitezele atomilor la temperatura dată au valori diferite: unii au viteze mai mari, alţii – mai mici. În urma interacţiunilor (ciocnirilor), atomii în mişcare primesc unii de la alţii energie suplimentară şi trec în stare excitată. Astfel, excitarea atomilor se produce pe seama energiei interne a corpului. Trecerea atomilor excitaţi în stări cu energii mai mici este însoţită de emisia undelor electromagnetice cu diverse lungimi de undă. Ca rezultat, **spectrul radiaţiei electromagnetice emise de corpurile încălzite este *continuu***.

La ridicarea temperaturii mişcarea termică se intensifică, atomii posedă energii cinetice mai mari. În consecinţă, cresc energiile atomilor excitaţi, iar emisia radiaţiei termice se amplifică. Concomitent, ridicarea temperaturii este însoţită de extinderea diapazonului de lungimi de undă ale radiaţiei emise. Dacă la temperatura camerei corpurile emit radiaţie infraroşie, invizibilă ochiului uman, la temperaturi de circa 500–600 °C ele emit şi radiaţie de culoare roşie, iar la ridicarea ulterioară a acesteia îşi modifică culoarea de la roşie la oranj, apoi la galbenă şi tot aşa până la cea albă.

Corpurile nu numai emit, dar și absorb radiația incidentă pe ele, gradul de absorbție fiind în funcție de natura substanței.

**Corpul care absoarbe absolut toată radiația incidentă pe suprafața lui este numit *corp absolut negru*.**

Radiația termică se deosebește esențial de cea luminescentă prin faptul că se poate afla în echilibru termic cu corpurile cu care interacționează.

Ne imaginăm o cavitate în interiorul unui corp *A* înconjurat cu un înveliș adiabatic (*fig. 5.1*). El nu face schimb de energie cu mediul înconjurător. Admitem că în interiorul cavității se află două corpuri, *B* și *C*, având temperaturi diferite, precum și de cea a corpului *A*. Toate acestea emit radiație termică în cavitate și absorb parțial radiația incidentă pe ele. Are loc un schimb continuu de energie: corpurile mai calde emit mai multă energie decât absorb, cele reci, invers, absorb mai mult decât emit. În consecință, primele corpuri se răcesc, iar celelalte se încălzesc. Acest schimb de căldură prin radiație durează până la egalarea temperaturii corpurilor. Ele trec în stare de echilibru termic atât între ele, cât și cu radiația termică din interiorul cavității. Temperatura radiației termice este egală cu cea a corpurilor.

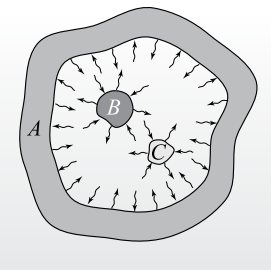



*Fig. 5.1*

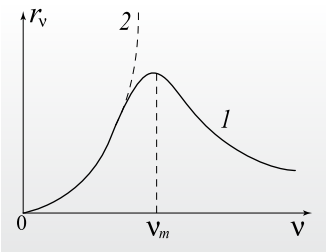


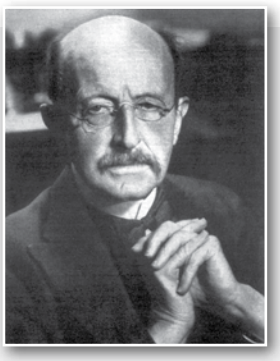

*Fig. 5.2*

După stabilirea echilibrului termic, procesele de emisie și de absorbție a radiației continuă, fiecare porțiune de suprafață a corpului emite o cantitate de energie egală cu cea absorbită în același interval de timp. Situația este similară celei ce are loc la echilibrul termic dintre lichid și vaporii săi saturați – numărul de molecule ce trec din starea lichidă a substanței în cea gazoasă este egal cu numărul de molecule ce trec în sens invers. În condiția de echilibru termic, corpul care emite multă energie, de asemenea, absoarbe mai multă energie. Această concluzie, formulată strict în termeni respectivi, este cunoscută ca **legea lui Kirchhoff pentru radiația termică**.

În urma numeroaselor experimente, în anul 1893 au fost formulate legile principale ale radiației termice de echilibru și ale comportării ei la variația temperaturii. A devenit necesară și explicarea teoretică a acestora. S-a constatat că mărimea fizică ce descrie detaliat radiația termică de echilibru este **densitatea spectrală a emitanței $r_\nu$. Ea este numeric egală cu energia radiației emise de o suprafață de arie unitară a corpului într-o unitate de timp având frecvențele într-un interval unitar de frecvențe care conține valoarea $\nu$.** Această mărime este în funcție de frecvență și de temperatură, iar cunoașterea explicită a expresiei respective permite să fie deduse legile experimentale.

Experimental a fost obținut graficul ce reprezintă densitatea spectrală a emitanței corpului absolut negru în funcție de frecvență (curba *1* din *figura 5.2.*). Existența maximului denotă faptul că corpul absolut negru aproape nu emite unde electromagnetice cu frecvențe foarte mici și foarte mari. Majoritatea undelor emise au frecvențele în vecinătatea frecvenței $\nu_m$, ce corespunde maximului densității spectrale $r_\nu$.

S-au depus eforturi pentru a deduce teoretic, în baza concepțiilor și legităților fizicii clasice, formula



MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK
(1858–1947)
*fizician teoretician german*

A efectuat primele cercetări în domeniul termodinamicii, a studiat diferite aplicații ale principiului al doilea, indicând semnificația acestui principiu pentru procesele ireversibile. Cel mai important rezultat al său (a. 1900) se referă la teoria radiației termice de echilibru a corpului negru. A lansat ipoteza cuantelor, ceea ce i-a permis să deducă expresia corectă pentru densitatea spectrală a emitanței, iar în baza acesteia să deducă legile experimentale ale radiației termice stabilite anterior. Pentru aceste lucrări în anul 1918 a fost distins cu Premiul Nobel. Adept fidel al teoriei relativității (termen propus de Planck), a dedus ecuațiile dinamicii relativiste (a. 1906), a obținut expresia relativistă pentru energia și impulsul electronului. A efectuat cercetări în domeniul termodinamicii statistice relativiste, a introdus în circuitul științific două constante universale: constanta *h* numită ulterior *constanta lui Planck* și *constanta lui Boltzmann* (*k*). Este autor de cărți publicate în domeniul istoriei și metodologiei fizicii și al filosofiei.
Max Planck este considerat unul dintre fondatorii fizicii moderne. Lucrările sale au fost înalt apreciate de Albert Einstein.

explicită pentru $r_\nu$, care ar corespunde curbei experimentale *1* din *figura 5.2*. Formula obținută este reprezentată grafic prin curba *2* (linia întreruptă). Aceasta este conformă curbei experimentale doar la frecvențe mici ale radiației termice.

Formula ce descrie corect densitatea spectrală a emitanței corpului negru în funcție de frecvență și de temperatură a fost obținută de către Planck. Acesta a lansat o ipoteză neordinară, numită ulterior **ipoteza cuantelor**.

**Corpurile emit și absorb energia radiației nu în mod continuu, adică în orice cantități, ci în mod discret, în cantități multiple unei energii minime.**

Această cantitate minimă, porțiune, de energie a fost numită **cuantă de energie** (lat. *quantum* „cantitate"). Planck a stabilit că valoarea cuantei de energie ε este direct proporțională cu frecvența radiației ν, anume:

$$\varepsilon = h\nu. \qquad (5.1)$$

Aici $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ J·s este o constantă universală, numită ulterior **constanta lui Planck**.

Planck a comunicat rezultatele obținute la ședința Societății Fizicienilor Germani ce a avut loc la Berlin, la 14 decembrie 1900. Această dată este considerată „zi de naștere" a fizicii cuantice, care a determinat dezvoltarea fizicii și a aplicațiilor ei pe întregul parcurs al secolului XX.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Care stare a atomului este numită fundamentală? Dar care excitată?
2. Care este deosebirea dintre tipurile de excitare a atomilor în cazurile luminescenței și radiației termice?
3. În ce constă echilibrul dinamic dintre radiația termică de echilibru și corpurile cu care interacționează?
4. Care corp, la temperatura dată, emite mai multă energie în același interval de timp: cel negru sau cel alb?
5. În camera iluminată vedem o cană de faianță de culoare albă, ornată cu un trandafir negru. Încălzită până la o temperatură înaltă (de circa 1 000°C), cana este introdusă într-o cameră întunecată. Care este aspectul ei pentru observatorul din această cameră?
6. Care este caracterul variației energiei atomului din punctul de vedere al ipotezei cuantelor lui Planck?
7. Determinați energia cuantei ce corespunde luminii cu lungimea de undă de 693 nm.
8.* Stabiliți frecvența ce corespunde cuantei a cărei energie este egală cu energia cinetică medie a atomului de heliu la temperatura de 527 °C.

## 5.2. EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN

### a. Efectul fotoelectric. Legi experimentale

În anul 1887, H. Hertz, studiind undele electromagnetice obținute în urma descărcării electrice prin scântei între doi electrozi, a constatat că iluminarea electrodului negativ cu radiație ultravioletă înlesnește descărcarea – la aceeași tensiune electrică ea se produce la o distanță mai mare dintre electrozi decât în lipsa iluminării. În același an observația dată a fost expusă în lucrarea sa „Despre influența luminii ultraviolete asupra descărcării electrice". În anul 1887, Wilhelm Hallwachs (1859–1922), la sugestia lui Hertz, a realizat un experiment în care a stabilit că în urma iluminării cu radiație ultravioletă a corpului metalic încărcat cu sarcină negativă acesta se descarcă.

Pentru a explica aceste experimente Hallwachs a emis (a. 1888) ipoteza: **radiația ultravioletă provoacă eliberarea din metal a unor particule încărcate cu sarcină electrică negativă, iar acestea înlesnesc descărcarea electrică**. Pentru fenomenul cercetat a fost propusă denumirea de **efect fotoelectric extern**. În anul 1899, Philipp Lenard (1862–1947), fost asistent al lui Hertz, a stabilit că particulele negative sunt *electroni* (particule descoperite în 1897 de către J.J. Thomson).

**Emisia electronilor de către corpurile solide și cele lichide sub acțiunea radiației electromagnetice a fost numită *efect fotoelectric extern*. Electronii emiși sunt numiți *fotoelectroni*, astfel indicându-se modalitatea obținerii lor.**

Savanții germani menționați, precum și Augusto Righi (1850–1920) în Italia și Alexandr Stoletov (1839–1896) în Rusia, au studiat legitățile efectului fotoelectric extern. Schema de principiu a instalației utilizate în acest scop este reprezentată în *figura 5.3*. Tubul *T* are în interiorul său doi electrozi: catodul *C* și anodul *A*. Radiația electromagnetică cade pe catod

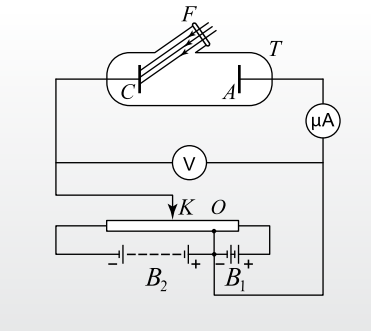



Fig. 5.3

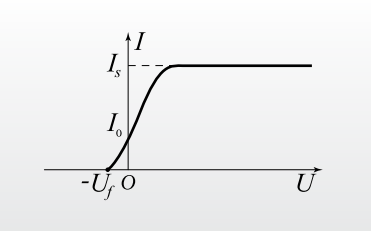



Fig. 5.4

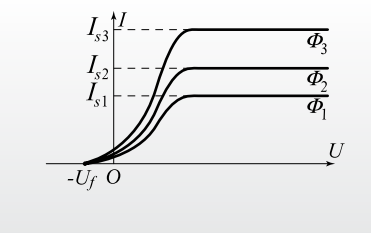



Fig. 5.5

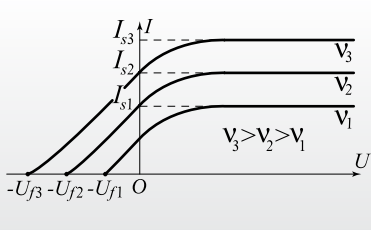



Fig. 5.6

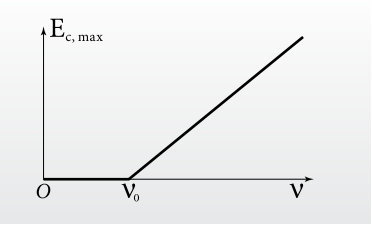



Fig. 5.7

trecând prin ferestruica de cuarț *F* (cuarțul este transparent pentru radiațiile ultraviolete, dar sticla obișnuită le reține). Aerul din tub este evacuat pentru a nu influența mișcarea fotoelectronilor.

Partea electrică a instalației permite modificarea atât a valorii tensiunii dintre electrozi, cât și a polarității ei. În poziția *O* a cursorului tensiunea electrică dintre catod și anod este nulă. La deplasarea cursorului *K* de la poziția *O* spre stânga, potențialul anodului *A* este mai mare decât al catodului *C*, câmpul electric din tub accelerează electronii. Tensiunea acceleratoare (pozitivă) se mărește pe măsură ce cursorul se îndepărtează tot mai mult de poziția *O*. Dacă însă cursorul *K* se deplasează spre dreapta de la poziția nulă *O*, potențialul anodului este mai mic decât cel al catodului și electronii ce se mișcă de la catod spre anod sunt frânați de câmpul electric. Tensiunea de frânare (negativă) $U_f$ devine tot mai mare pe măsura îndepărtării cursorului spre dreapta.

Se modifică tensiunea *U* dintre catod și anod, măsurată cu voltmetrul V și se înregistrează valorile respective ale intensității curentului *I*, numit frecvent și **fotocurent**, indicate de microampermetrul μA. În timpul fiecărui experiment fasciculul de radiație monocromatică incidentă pe catod se menținea invariabil. În baza datelor obținute a fost trasată caracteristica curent–tensiune (*fig. 5.4*).

Să analizăm detaliat caracterul dependenței intensității curentului electric prin tub de tensiunea dintre electrozi. Se observă că prin tub circulă curent electric și în lipsa tensiunii dintre catod și anod: la $U = 0$ avem $I = I_0$. Aceasta denotă faptul că electronii emiși de catod sub influența radiației electromagnetice incidente pe el posedă energii cinetice, ceea ce le permite să ajungă la anod nefiind atrași de acesta.

Creșterea tensiunii pozitive *U* (ramura din dreapta originii O) este însoțită inițial de creșterea lentă a intensității *I*, ceea ce se explică prin faptul că la mărirea tensiunii mai mulți fotoelectroni ajung la anod. Creșterea intensității însă este limitată de valoarea maximă $I_s$ – **intensitatea curentului de saturație**. În aceste condiții toți electronii ($N_t$) emiși de catod într-o unitate de timp ajung la anod. Fiecare electron transportă o sarcină electrică egală în modul cu sarcina elementară *e*, deci în fiecare secundă prin tub este transportată sarcina electrică $N_t e$. Rezultă că intensitatea curentului de saturație

$$I_s = N_t e. \qquad (5.2)$$

În domeniul tensiunilor negative potențialul catodului este mai mare decât cel al anodului. Prin urmare, fotoelectronii ce se deplasează spre anod sunt frânați de câmpul electric din tub. Un număr tot mai mic de electroni, cei cu energii cinetice mai mari, ajung la anod. Ca rezultat, intensitatea curentului se micșorează. La o valoare $U_f$ a tensiunii inverse curentul devine nul: electronii cu energia cinetică maximă $E_{c,\max}$ sunt frânați și se opresc în vecinătatea nemijlocită a anodului. Tensiunea respectivă $U_f$ este numită **tensiune de frânare** sau **de stopare**. În aceste condiții lucrul câmpului electric $eU_f$ este egal cu energia cinetică maximă a fotoelectronilor:

$$E_{c,\max} = eU_f. \qquad (5.3)$$

În *figura 5.5.* sunt reprezentate caracteristicile curent–tensiune pentru valori diferite ale **fluxului de energie** $\Phi$ al radiației incidente (al energiei incidente pe catod într-o unitate de timp) la una și aceeași frecvență $\nu$. S-a constatat că intensitatea curentului de saturație $I_s$ este direct proporțională cu fluxul de energie: $I_s \sim \Phi$. Acest rezultat este cunoscut ca

***legea întâi a efectului fotoelectric:*** **intensitatea curentului fotoelectric de saturație este direct proporțională cu fluxul de energie al radiației incidente pe catod când frecvența ei rămâne constantă.**

Conform relației (5.2), această lege poate fi formulată, în același mod, și pentru numărul de fotoelectroni $N_t$ emiși de catod într-o unitate de timp.

Caracteristicile curent–tensiune corespunzătoare diferitor frecvențe $\nu$ ale radiației incidente la aceeași valoare a fluxului de energie incident sunt reprezentate în *figura 5.6.* Determinând valorile tensiunii de frânare din *figurile 5.5* și *5.6* și utilizând (5.3), se pot calcula valorile energiei cinetice maxime a fotoelectronilor. În baza valorilor obținute s-a construit graficul care exprimă energia cinetică maximă în funcție de frecvența radiației incidente (*fig. 5.7*). La frecvențe mai mici decât valoarea $\nu_0$ efectul fotoelectric lipsește. Această valoare este numită **frecvență de prag** și depinde de natura substanței din care este confecționat catodul. Ea este numită, de asemenea, **prag roșu al efectului fotoelectric**.

Generalizând rezultatele menționate, pot fi formulate următoarele legi ale efectului fotoelectric (Lenard, a. 1902):

***legea a doua a efectului fotoelectric:*** **energia cinetică maximă a fotoelectronilor este în funcție liniară de frecvența radiației electromagnetice incidente și nu depinde de fluxul de energie al acesteia;**

***legea a treia a efectului fotoelectric:*** **efectul fotoelectric extern se produce numai dacă frecvența radiației incidente nu este mai mică decât cea de prag $\nu_0$, specifică fiecărui metal.**

O proprietate deosebită a acestui efect este faptul că fotocurentul începe a circula imediat după ce radiația electromagnetică cade pe catod. Electronul din metal primește momentan energia necesară pentru a ieși în afara metalului și nu o acumulează pe parcursul unui interval de timp. Aceasta permite să formulăm

***legea a patra a efectului fotoelectric:*** **efectul fotoelectric extern este lipsit de inerție.**

Legile expuse sunt aparent legi simple. În cadrul fizicii clasice poate fi explicată doar prima din ele: cu cât energia radiației incidente ce provoacă efectul fotoelectric extern este mai intensă, cu atât mai mulți fotoelectroni părăsesc metalul. Celelalte legi însă nu sunt conforme cu legitățile fizicii clasice și nu pot fi explicate în cadrul ei.

## b. Fotonii. Teoria cuantică a efectului fotoelectric extern

Pentru a explica legitățile efectului fotoelectric, A. Einstein a apelat la ipoteza cuantelor și a admis că proprietățile cuantice sunt proprii radiației (a. 1905). El scria: „…cred că fenomenele în care se manifestă emisia sau transformarea luminii se pot explica mai bine dacă presupunem că energia luminii se distribuie discret în spațiu… Energia fasciculului de lumină ce se propagă dintr-un punct nu se distribuie în mod continuu într-un volum tot mai mare, ci se constituie dintr-un număr finit de cuante de energie care sunt localizate în spațiu și sunt indivizibile, fiind emise sau absorbite numai ca un tot întreg".

Astfel, Einstein a ajuns la concluzia că există particule de lumină indivizibile, a căror energie este determinată de formula (5.1). Ulterior, în anul 1929, aceste particule au fost numite **fotoni** (gr. *photos* „lumină"). În procesele de emisie (absorbție) se emite (se absoarbe) un număr întreg de fotoni.

Să remarcăm caracteristicile fizice ale fotonului.

**Energia fotonului** este egală cu energia cuantei (5.1):

$$\varepsilon_f = h\nu. \qquad (5.4)$$

Din formula (4.23), care reprezintă interdependența dintre masă și energie $E = mc^2$, exprimăm **masa fotonului**:

$$m_f = \frac{\varepsilon_f}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}. \qquad (5.5)$$

**Viteza fotonului** în vid este egală cu viteza luminii:

$$v_f = c. \qquad (5.6)$$

Conform expresiei masei ca funcție de viteză $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, exprimăm masa de repaus $m_0 = m\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Substituind viteza fotonului $\nu_f = c$, pentru **masa de repaus a fotonului** obținem:

$$m_{0f} = 0. \qquad (5.7)$$

Fotonul există numai în mișcare cu viteza luminii, nu poate fi oprit și nu există în repaus.

Impulsul fotonului se exprimă prin relația:

$$p_f = m_f c = \frac{h\nu}{c}. \qquad (5.8)$$

Din punct de vedere electric, fotonul este o particulă neutră. **Sarcina electrică a fotonului** este nulă:

$$q_f = 0. \qquad (5.9)$$

Folosind relația dintre viteza de propagare a undei $c$, lungimea de undă $\lambda$ și frecvența $\nu$, anume $\nu = \frac{c}{\lambda}$, în continuare expunem expresiile pentru energia, masa și impulsul fotonului prin lungimea de undă:

$$\varepsilon_f = \frac{hc}{\lambda}, \qquad m_f = \frac{h}{c\lambda}, \qquad p_f = \frac{h}{\lambda}. \qquad (5.10)$$

Conform concepției lui Einstein, **lumina prezintă un flux de fotoni**. Aceasta permite să fie explicate, relativ simplu, legile efectului fotoelectric extern. Se consideră că **fiecare electron este emis în urma absorbției unui singur foton**.

La un flux mai mare de energie a radiației incidente pe catod, pe acesta cad mai mulți fotoni. Ca rezultat, catodul va emite mai mulți electroni într-o unitate de timp, intensitatea curentului fotoelectric de saturație se amplifică – ***legea întâi***.

Fotonul, interacționând cu electronul substanței (din vecinătatea suprafeței acesteia), îi transmite momentan toată energia sa. Dacă electronul se mișcă spre suprafața corpului, acesta iese, practic, imediat din corp. Prin urmare, efectul fotoelectric este lipsit de inerție – ***legea a patra*** a efectului fotoelectric.

Pentru a părăsi corpul, electronul trebuie să efectueze un lucru mecanic $L_e$, învingând forțele electrice care acționează asupra lui din partea ionilor pozitivi ai substanței și-l reține în corp. Acest lucru mecanic $L_e$ este numit **lucru de extracție** sau **de ieșire**. Valoarea lui depinde de natura substanței și se exprimă, de regulă, în electron-volți (eV). Amintim că 1 eV = $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J. Lucrul de extracție pentru majoritatea metalelor este de ordinul a câțiva electron-volți. De exemplu, la potasiu este egal cu 2,2 eV, la litiu – cu 2,3 eV, la zinc – cu 4,0 eV, la argint – cu 4,3 eV, la platină – cu 5,3 eV. Valoarea lucrului de extracție depinde și de calitatea prelucrării suprafeței corpului.

În urma interacțiunii dintre fotonul incident și electronul substanței, fotonul dispare, iar electronul preia energia $h\nu$ a acestuia. În conformitate cu legea conservării și transformării energiei, electronul ieșit în afara metalului posedă energie cinetică $E_c$ mai mică decât energia sa în interiorul corpului cu valoarea lucrului de extracție $L_e$, adică:

$$E_c = h\nu - L_e. \qquad (5.11)$$

Această energie o posedă fotoelectronii extrași de lângă suprafața corpului. Cei extrași din interiorul lui, în mișcarea spre suprafață, pot pierde o parte din energie în urma ciocnirilor cu alți electroni. Acești electroni au în afara corpului o energie cinetică mai mică decât valoarea determinată din (5.11). Conchidem că energia cinetică din (5.11) este **energie cinetică maximă** a fotoelectronilor.

Introducând în (5.11) expresia energiei cinetice $E_c = \frac{mv_{\max}^2}{2}$, transcriem relația dată sub forma

$$h\nu = L_e + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \qquad (5.12)$$

Ultima relație, precum și (5.11), se numește **ecuația lui Einstein pentru efectul fotoelectric extern**. Ea poate fi considerată expresie matematică a ***legii a doua a acestui efect.*** Energia cinetică maximă a fotoelectronilor depinde doar de frecvența radiației incidente și de natura substanței care emite electronii.

Energia cinetică este mărime pozitivă sau nulă pentru corpul aflat în repaus. Din (5.12) rezultă condiția pentru frecvența $\nu$ a radiației ce produce emisia fotoelectronilor: $h\nu - L_e \geq 0$, adică

$$\nu \geq \frac{L_e}{h} = \nu_0. \qquad (5.13)$$

Astfel, s-a obținut cea de-***a treia lege a efectului fotoelectric***, precum și relația dintre frecvența de prag $\nu_0$ și lucrul de extracție $L_e$.

Graficul care reprezintă energia cinetică maximă a fotoelectronilor (determinată experimental în baza relației (5.3)) în funcție de frecvență este, conform ecuației lui Einstein, o funcție liniară, în concordanță cu graficul obținut pe cale experimentală (*fig. 5.7*). Coeficientul de proporționalitate $h$ este o constantă fundamentală. Prin urmare, graficele care exprimă relația dată pentru substanțe diferite sunt segmente de dreaptă paralele între ele.

Astfel, Einstein, dezvoltând și modificând interpretarea ipotezei cuantelor, a reușit să explice legitățile efectului fotoelectric extern. Acesta a fost al doilea succes al teoriei, având la bază ipoteza cuantelor. El a fost urmat de multe alte realizări ale fizicii cuantelor, care a dominat dezvoltarea fizicii în secolul XX.

## c. Celule fotoelectrice

Aplicaţiile efectului fotoelectric sunt determinate de faptul că acesta permite modificarea intensităţii curentului în circuit variind fluxul de radiaţie electromagnetică incidentă pe catod. Dispozitivele care funcţionează în baza acestui efect sunt numite **celule fotoelectrice**.

**Celula fotoelectrică cu vid** reprezintă un balon de sticlă, pe o parte din suprafaţa interioară a căruia este depus un strat subţire de metal care conduce bine curentul electric (*fig. 5.8*). Acest strat este acoperit cu un alt strat fotosensibil din metal, oxid de bariu, compuşi ai ceziului cu stibiu sau din altă substanţă cu lucru de extracţie mic pentru ca efectul să se producă şi sub acţiunea radiaţiei vizibile. Acest strat dublu este catodul (*1*). În centrul celulei este plasat anodul (*2*) de forma unui inel. Partea balonului din faţa catodului este transparentă, prin aceasta lumina cade din exterior pe catod.

Celula fotoelectrică este folosită în cuplu cu un releu electromagnetic, al cărui element principal este un electromagnet care închide sau deschide, în funcţie de iluminarea catodului, un circuit electric. Astfel de circuite dirijează dispozitivele ce efectuează acţiuni prevăzute (*fig. 5.9*).

Celulele cu vid acţionează, practic, fără inerţie, ceea ce condiţionează aplicarea lor în instalaţii care necesită o reacţionare rapidă. De exemplu, la numărarea unor obiecte în mişcare, la suspendarea automată a funcţionării unor instalaţii în cazul în care muncitorii ar pătrunde în zone interzise – cu pericol pentru viaţă, la aprinderea şi stingerea automată a farurilor maritime şi a luminii stradale etc. Un neajuns al celulelor fotoelectrice cu vid este valoarea mică a curentului electric, ceea ce necesită montarea unui amplificator între celulă şi releu.

Intensitatea curentului este mai mare prin **celulele fotoelectrice cu gaz**, baloanele cărora au aceeaşi construcţie ca cele cu vid, dar conţin gaze inerte, mai frecvent argon, la presiuni joase (de circa 10 Pa). Fotoelectronii în calea lor spre anod ionizează prin ciocnire atomii gazului. Astfel, numărul de electroni liberi creşte, deci şi intensitatea curentului se măreşte. Aceste celule posedă o anumită inerţie, condiţionată de necesitatea unui interval de timp în care se produce ionizarea.

Din clasa a XI-a cunoaşteţi principiul de funcţionare a **fotorezistoarelor** – dispozitive semiconductoare, a căror rezistivitate se micşorează când ele se află sub influenţa radiaţiei luminoase. Sub acţiunea radiaţiei unii electroni părăsesc legăturile covalente dintre atomi, ca rezultat creşte concentraţia electronilor de conducţie şi a golurilor, ceea ce condiţionează micşorarea rezistivităţii. Electronii de conducţie rămân în interiorul semiconductorului şi din acest motiv efectul de părăsire a legăturilor covalente de către electroni este numit **efect fotoelectric intern**. Dispozitivele în care este utilizat acest efect se numesc **celule fotoelectrice semiconductoare**. Celulele semiconductoare sunt mai sensibile la radiaţie decât cele cu vid. Ele funcţionează atât în domeniul vizibil, cât şi în cel infraroşu. Celulele fotoelectrice semiconductoare au aplicaţii similare celulelor cu vid.

Efectul fotoelectric intern este aplicat, de asemenea, în **celula fotovoltaică** – o sursă de curent electric. Aceasta reprezintă o joncţiune *p-n* semiconductoare asupra regiunii de contact a căreia este orientat un fascicul de lumină (*fig. 5.10*). Prin efect fotoelectric intern unii electroni părăsesc legăturile covalente dintre atomi, deci creşte concentraţia electronilor de conducţie şi a golurilor. Sub acţiunea câmpului electric existent în regiunea joncţiunii golurile din regiunea *n* trec în regiunea *p*, iar electronii de conducţie – în sens invers. Ca rezultat, potenţialul regiunii *p* devine mai mare decât cel al regiunii *n*, între ele stabilindu-se o diferenţă de potenţial. Prin consumatorul conectat la regiunile joncţiunii circulă curent electric. Astfel, celula fotovoltaică reprezintă o sursă de curent electric. Ea transformă energia luminii direct în energie electrică. Din celulele voltaice se montează baterii solare, care se utilizează atât în cazul navelor cosmice, cât şi în condiţii terestre.

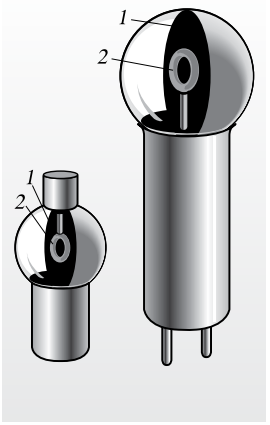



Fig. 5.8

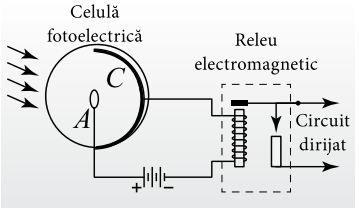



Fig. 5.9

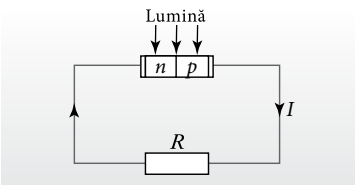



Fig. 5.10

## Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă efectul fotoelectric extern?
2. Cum se explică existența, la tensiune nulă, a curentului fotoelectric dintre electrozi?
3. Care factor determină existența curentului de saturație? Cum poate fi modificată valoarea lui?
4. Cum poate fi determinată experimental energia cinetică maximă a fotoelectronilor?
5. Determinați energia fotonului ce corespunde luminii de culoare verde având lungimea de undă egală cu 550 nm.
6. Calculați impulsul fotonului cu energia de $2{,}85 \cdot 10^{-19}$ J. Ce culoare are lumina respectivă?
7. Determinați lungimea de undă ce corespunde pragului roșu pentru argint.
8. Catodul din potasiu este iluminat cu radiație electromagnetică având frecvența de $6{,}3 \cdot 10^{14}$ Hz. Determinați energia cinetică maximă a fotoelectronilor emiși.
9. Să se determine viteza maximă a fotoelectronilor emiși de catod sub acțiunea radiației electromagnetice cu lungimea de undă egală cu 0,475 μm, dacă lungimea de undă de prag roșu pentru materialul catodului este de 0,566 μm.
10. Care sunt avantajele și dezavantajele celulei fotoelectrice cu vid față de celula cu gaz inert?
11. Prin ce se deosebește efectul fotoelectric intern de cel extern?

## 5.3.* PRESIUNEA LUMINII

În lucrarea sa fundamentală, *Tratat despre electricitate și magnetism* (a. 1873), Maxwell a expus teoria câmpului electromagnetic, în cadrul căreia a prezis existența undelor electromagnetice și a descris proprietățile lor. Maxwell a demonstrat că aceste unde sunt transversale, vectorul electric $\vec{E}$ și cel magnetic $\vec{B}$ fiind perpendiculari atât între ei, cât și pe direcția vitezei $\vec{v}$ de propagare a undei. Sensul vectorului $\vec{v}$ coincide cu sensul înaintării burghiului cu filet de dreapta la rotirea mânerului său de la vectorul $\vec{E}$ spre $\vec{B}$. Maxwell a demonstrat, de asemenea, că undele electromagnetice, deci și cele luminoase, produc presiune pe suprafața pe care cad.

Pentru a explica existența presiunii luminii, considerăm suprafața plană $S$ a unui corp și o undă electromagnetică ce cade perpendicular pe ea (*fig. 5.11*). În figură vectorul $\vec{E}$ are același sens cu axa $Ox$, vectorul $\vec{B}$ – cu axa $Oy$ și vectorul $\vec{v}$ – cu axa $Oz$. După o semiperioadă, vectorii $\vec{E}$ și $\vec{B}$ au sens opus axelor respective, vectorul vitezei $\vec{v}$ nu-și modifică însă sensul.

Câmpul electric al undei imprimă accelerație purtătorilor liberi de sarcină electrică din corp, mișcarea lor devenind ordonată. În sensul vectorului electric $\vec{E}$ circulă curent electric $I$ care variază periodic în timp, asemenea vectorului $\vec{E}$ al undei. În *figura 5.11* curentul electric $I$ are sensul axei $Ox$. Aplicând regula mâinii stângi, constatăm că forța electromagnetică $\vec{F}$, ce acționează asupra acestui curent din partea câmpului magnetic $\vec{B}$ al undei, este orientată spre interiorul corpului, în sensul axei $Oz$. După o semiperioadă, vectorii $\vec{E}$ și $\vec{B}$ își schimbă sensurile în opuse, dar se poate verifica ușor că sensul forței $\vec{F}$ rămâne același. Astfel,

**unda luminoasă ce cade perpendicular pe suprafața corpului produce presiune determinată de forța electromagnetică (*F*).**

Pentru valoarea presiunii, Maxwell a obținut expresia:

$$p = (1 + R)\, w, \qquad (5.14)$$

unde $w$ este densitatea volumică a energiei undei electromagnetice (energia câmpului electromagnetic dintr-o unitate de volum), iar $R$ este coeficientul de reflexie, egal cu partea de energie care se reflectă de la suprafața corpului.

În cazul corpului negru $R = 0$ și $p_n = w$, iar în cazul oglinzii $R = 1$ și $p_0 = 2w$. În acest fel, presiunea produsă de undă asupra corpului reflector este de două ori mai mare decât cea produsă asupra corpului negru.

Primul studiu experimental al presiunii luminii a fost realizat de către fizicianul rus Piotr Lebedev (1866–1912), care a măsurat presiunea produsă asupra corpurilor solide (a. 1900). Partea principală a instalației era o balanță de torsiune cu fir subțire de care era suspendată o tijă având fixate simetric, lateral, perechi de aripioare ușoare (*fig. 5.12*). Aripioarele dintr-o parte a tijei erau negre, iar de cealaltă parte – strălucitoare. Firul de suspensie și tija se aflau într-un vas din care era evacuat aerul pentru a reduce la minim influența ciocnirilor moleculelor de aer cu aripioarele asupra experimentului.

Căzând pe aripioare, lumina exercita asupra aripioarelor strălucitoare o presiune de aproximativ de două ori mai mare decât asupra celor negre, conform formulei (5.14). Drept rezultat, tija se rotea și răsucea firul elastic de care era suspendată. Măsurând unghiul de rotație a tijei și cunoscând caracteristicile instalației (lungimea și diametrul firului, dimensiunile aripioarelor, distanța dintre centrele lor și axa de rotație etc.), Lebedev a calculat presiunea produsă de lumină. S-a constatat că rezultatele obținute coincid cu cele ale lui Maxwell cu o precizie de circa 10%.

Determinarea experimentală a presiunii luminii a fost un argument forte în favoarea teoriei câmpului electromagnetic a lui Maxwell și a consecințelor ei.

Existența presiunii luminii se explică și în cadrul teoriei fotonice. Calculele se efectuează ca în cazul presiunii produse de gaz asupra pereților vasului în care se află. Aici se iau în considerare ciocnirile dintre fotoni și corpurile pe care aceștia cad. În urma ciocnirilor impulsurile fotonilor variază, deci asupra lor acționează forțe din partea corpurilor pe care ei cad. În baza principiului acțiunii și reacțiunii, concludem că fotonii acționează asupra corpurilor pe care cad și produc presiune.

Faptul că presiunea produsă de lumină asupra corpului reflector este de două ori mai mare decât cea produsă de aceeași lumină asupra corpului negru se explică relativ simplu: variația impulsului fotonului ce se reflectă de la suprafața pe care cade perpendicular este de două ori mai mare decât a fotonului absorbit, al cărui impuls final este zero. În cadrul teoriei fotonice pentru presiunea luminii se obține aceeași expresie (5.14) ca și în teoria câmpului electromagnetic.

Astfel, presiunea luminii poate fi explicată atât din punctul de vedere al teoriei câmpului electromagnetic, cât și din cel al teoriei fotonice.

În concluzie menționăm că unele fenomene ca radiația termică, efectul fotoelectric etc. pot fi explicate numai în cadrul teoriei fotonice (corpusculare) a luminii. Totodată, interferența, difracția și polarizarea luminii se explică doar în cadrul teoriei ondulatorii. Rezultă că lumina posedă atât proprietăți ondulatorii, cât și corpusculare. **Natura luminii s-a dovedit a fi complexă, purtând un caracter dual: undă–corpuscul.**

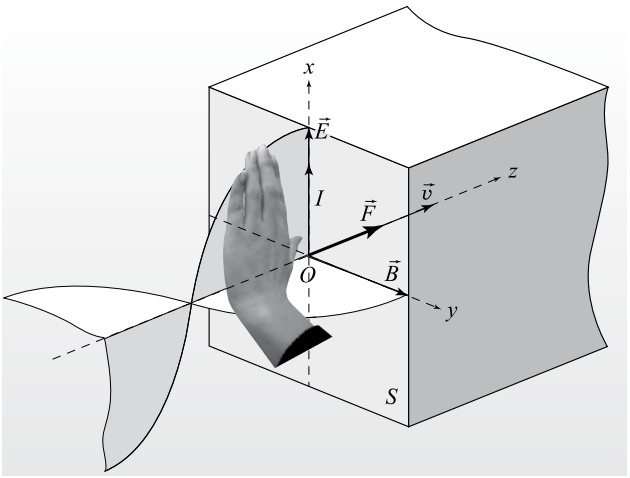



*Fig. 5.11*

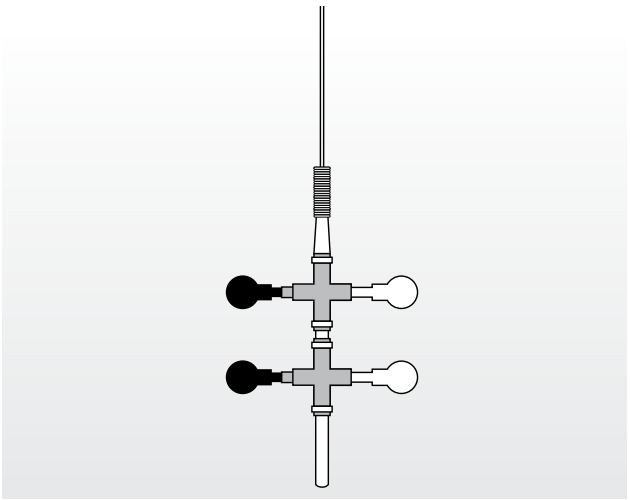


*Fig. 5.12*

## Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se explică existența presiunii luminii în cadrul teoriei câmpului electromagnetic?
2. Care este explicația presiunii luminii din punctul de vedere al teoriei fotonice?
3. Cum explică teoria fotonică faptul că presiunea asupra suprafeței strălucitoare este de două ori mai mare decât asupra celei negre?
4. Din ce cauză partea mobilă a instalației lui Lebedev se rotește la căderea luminii pe aripioarele ei?
5. Care ar fi explicația cu privire la forma cozii cometelor față de cea a nucleului lor?

## 5.4.* PROPRIETĂŢILE ONDULATORII ALE MICROPARTICULELOR. DUALISMUL UNDĂ–CORPUSCUL

### a. Undele de Broglie. Difracţia electronilor

Mai sus s-a demonstrat că lumina posedă atât proprietăţi ondulatorii, cât şi corpusculare, adică are un caracter dual: **undă–corpuscul**. Relaţiile dintre caracteristicile ondulatorii şi cele corpusculare, adică dintre lungimea de undă $\lambda$ şi frecvenţa luminii $\nu$, pe de o parte, şi impulsul $p_f$ şi energia fotonului $\varepsilon_f$, pe de altă parte, sunt exprimate de formulele (5.4) şi (5.10):

$$\varepsilon_f = h\nu,\ p_f = \frac{h}{\lambda}. \qquad (5.15)$$

În anul 1923, tânărul fizician francez Louis de Broglie (1892–1987) a prezentat Academiei de Ştiinţe din Paris un memoriu, în care a expus o idee îndrăzneaţă:

**Particulele de substanţă posedă proprietăţi ondulatorii.**

Anume particulei caracterizate de impulsul $p=mv$ şi energia $E$ i se asociază o undă, ulterior numită **undă de Broglie**, a cărei lungime de undă $\lambda$ şi frecvenţă $\nu$ se exprimă prin relaţiile (5.15) stabilite pentru fotoni:

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv},\ \nu = \frac{E}{h}. \qquad (5.16)$$

Referitor la ipoteza lui Louis de Broglie, Einstein a menţionat că aceasta este „o primă rază timidă de lumină orientată asupra uneia dintre cele mai întunecate enigme ale fizicii".

Mai târziu, în legătură cu ipoteza sa, Louis de Broglie scria: „În optică pe parcursul unui secol a fost neglijat aspectul corpuscular în comparaţie cu cel ondulatoriu: nu s-a comis oare o eroare inversă în cazul substanţei? Nu am greşit noi oare luând în considerare prea mult aspectul corpuscular şi neglijându-l pe cel ondulatoriu? După multe cugetări şi raţionamente, deodată eu am înţeles (în anul 1923) că descoperirea efectuată de Einstein în 1905 trebuie generalizată şi extinsă asupra tuturor particulelor materiale, în caz particular, a electronilor".

O ipoteză devine adevăr ştiinţific doar dacă este confirmată experimental. În cazul ipotezei lui Louis de Broglie un astfel de experiment ar fi cel în care s-ar observa un fenomen ce poate fi explicat doar în cadrul teoriei ondulatorii, de exemplu, difracţia particulelor. Se ştie că difracţia luminii se observă numai în cazul în care dimensiunea obstacolului, de exemplu, lăţimea fantei sau perioada reţelei de difracţie, este de ordinul lungimii de undă.

Să estimăm lungimea de undă de Broglie pentru un electron care a parcurs o tensiune acceleratoare $U = 100$ V. Egalăm energia cinetică a electronului cu lucrul câmpului electric: $\frac{m_e v^2}{2} = eU$, unde masa electronului $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg şi sarcina electrică elementară $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Viteza electronului $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$ şi impulsul $p = m_e v = \sqrt{2em_eU}$.

Pentru lungimea de undă de Broglie din (5.16) se obţine:

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2em_eU}}. \qquad (5.17)$$

În urma calculelor numerice se obţine valoarea $\lambda_B \approx 1{,}2 \cdot 10^{-10}$ m.

Reţele de difracţie cu perioadă de acest ordin nu pot fi confecţionate artificial, dar se întâlnesc în natură. Acestea sunt reţelele cristaline a căror perioadă este de ordinul diametrului atomului, adică de ordinul $10^{-10}$ m. În cazul particulelor de masă mai mare, după cum rezultă din (5.17), lungimea de undă de Broglie este şi mai mică, deci difracţia lor este şi mai greu de observat. De aceea relatăm, de obicei, despre **proprietăţile ondulatorii ale microparticulelor**. Numai la ele pot fi observate astfel de proprietăţi.

În anul 1927, fizicienii americani Clinton Joseph Davisson (1881–1958) şi Lester Halbert Germer (1896–1971) au realizat un experiment în care un fascicul de electroni era orientat pe suprafaţa unui monocristal de nichel şi erau înregistraţi electronii reflectaţi. Tensiunea la care aceştia erau accelerаţi avea ordinul de circa 50 V. Electronii nu puteau pătrunde adânc în interiorul metalului şi se reflectau de la straturile de atomi de la suprafaţa lui.

Notăm cu $\theta$ unghiul dintre viteza electronilor incidenţi şi suprafaţa metalului, egal cu unghiul format de viteza electronilor reflectaţi şi aceeaşi suprafaţă. În *figura 5.13* sunt reprezentate două straturi atomice de la suprafaţa metalului şi doi electroni ce se reflectă de la atomii $A$ şi $B$ care aparţin acestor straturi. În figură sunt expuse simbolic şi undele de Broglie asociate acestor electroni.

Din figură observăm că electronul reflectat de la atomul *B* parcurge o distanţă mai mare decât cel reflectat de la atomul *A*. Dacă *d* este distanţa dintre straturile de atomi, atunci diferenţa distanţelor parcurse $\Delta = CB + BD = 2CB = 2AB \sin\theta = 2d \sin\theta$.

Din punct de vedere ondulatoriu, reflexia este maximă în direcţiile pentru care diferenţa $\Delta$ este egală cu un număr întreg de lungimi de undă, adică în direcţiile ce satisfac condiţia

$$2d \sin\theta = m\lambda_B, \qquad (5.18)$$

unde $m = 1, 2, 3, \ldots$ .

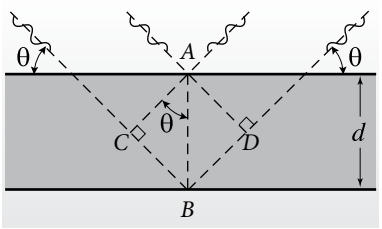


*Fig. 5.13*

Această condiţie a fost verificată în experimentul Davisson–Germer, a cărui schemă este prezentată în *figura 5.14*. Filamentul *F*, parcurs de curent electric, se încălzeşte şi emite electroni, adică joacă rolul de catod. Anodul *A* are o astfel de construcţie încât permite evidenţierea unui fascicul îngust de electroni care sunt acceleraţi de câmpul electric creat între catod şi anod. Partea instalaţiei în care se obţine fasciculul de electroni este denumită **tun electronic** şi este similar celui din tuburile cu fascicul electronic utilizate în televizoare, în monitoarele calculatoarelor etc. Fasciculul de electroni este orientat pe suprafaţa cristalului de nichel *B*.

Electronii reflectaţi de cristal nimeresc în interiorul cilindrului *C* unit cu un galvanometru. Cilindrul se poate deplasa astfel încât să înregistreze electronii reflectaţi în diferite direcţii.

Experimentele au confirmat condiţia (5.18), în care lungimea de undă de Broglie era calculată în baza formulei (5.17). Pentru a demonstra că proprietăţile ondulatorii nu sunt specifice numai electronilor, ulterior ele au fost observate şi la particule încărcate cu mase mai mari – protoni, ioni de heliu etc., precum şi la particule neutre – neutroni, atomi.

Rezumând cele expuse mai sus, conchidem

**atât undele electromagnetice, cât şi microparticulele posedă proprietăţi ondulatorii şi corpusculare.**
**În natură nu există nici unde, nici particule, ci obiecte care pot manifesta în unele condiţii proprietăţi ondulatorii, iar în altele – proprietăţi corpusculare. Această proprietate universală a naturii este numită *dualism: undă–corpuscul.***

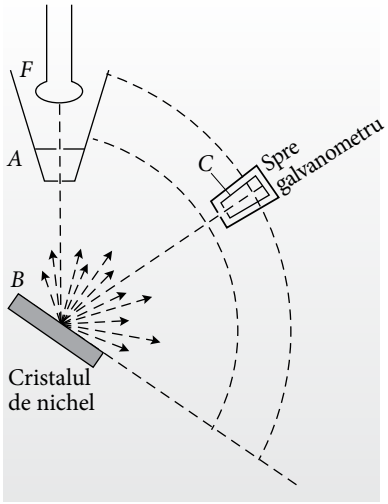


*Fig. 5.14*

Unul din creatorii mecanicii cuantice, fizicianul-teoretician austriac Erwin Schrödinger (1887–1961) a menţionat: **„Proprietăţile «ondulatorii» şi «corpusculare» nu se întâlnesc niciodată separat; ele reprezintă laturi diferite ale unora şi aceloraşi fenomene”**.

## b. Microscopul electronic

Microscopul este, după cum cunoaştem, un aparat optic folosit pentru observarea obiectelor de dimensiuni destul de mici încât nu pot fi văzute limpede cu ochiul liber. O caracteristică importantă a lui este **puterea de rezoluţie (de separare)** – mărimea inversă a distanţei minime dintre două puncte ale unui obiect plan care mai pot fi observate distinct. Această distanţă minimă este proporţională cu lungimea de undă $\lambda$ a luminii folosite la iluminarea obiectului. Deci puterea de rezoluţie este invers proporţională cu lungimea de undă $\lambda$. Cu cât lungimea de undă este mai mică, cu atât puterea de rezoluţie este mai mare.

Lungimea de undă a luminii are valori în intervalul de la circa $4 \cdot 10^{-7}$ până la $7{,}5 \cdot 10^{-7}$ m. Lungimea de undă de Broglie are valori considerabil mai mici. Conform formulei (5.17), pentru electronul accelerat la o tensiune electrică de 100 V s-a obţinut $\lambda_B \approx 1{,}2 \cdot 10^{-10}$ m, adică o valoare de câteva mii de ori mai mică decât lungimea de undă a luminii. Acest fapt a sugerat ideea construirii unui **microscop electronic** care ar funcţiona utilizând proprietăţile ondulatorii ale electronilor şi care ar avea o putere de rezoluţie de mii de ori mai mare decât cea a microscoapelor optice.

Primul microscop electronic a fost construit în Germania, în anii 1928–1931, de către inginerii Ernst Ruska (1906–1988) şi Max Knoll (1897–1969). În anul 1933, ei aveau deja un microscop electronic ce asigura o mărire de 12 000 de ori – performanţă net superioară microscoapelor optice.

După principiul de construcţie, microscoapele electronice sunt similare celor optice: un tun electronic ia locul sursei de lumină, iar lentilele optice sunt înlocuite de cele electromagnetice care dirijează mişcarea electronilor cu ajutorul câmpurilor electrice şi magnetice de configuraţii speciale. Fasciculul de electroni traversează „ţinta" – o foiţă foarte subţire – a cărei imagine mult mărită este obţinută în microscop.

Microscoapele electronice moderne au permis obţinerea imaginilor diferitor obiecte de dimensiuni foarte mici, inclusiv a unor molecule şi atomi mai mari.

Au fost construite, de asemenea, microscoape ionice care măresc de zeci de ori mai mult decât microscoapele electronice. Difracţia neutronilor se utilizează la cercetările microstructurii aliajelor, a proprietăţilor magnetice ale diferitor substanţe, inclusiv a macromoleculelor biologice, a transformărilor de fază etc.

### E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Chimistul, inginerul și inventatorul suedez Alfred Bernhard Nobel (1833–1896), cunoscut ca inventator al dinamitei și al altor substanțe explozibile, a donat cea mai mare parte din imensa lui avere înființării Premiilor Nobel. Acestea au devenit cele mai importante dintre toate premiile internaționale. Anual se acordă câte un Premiu Nobel și pentru realizări deosebite în domeniul fizicii.
În lista laureaților acestor premii se află și numele savanților care au pus bazele fizicii cuantice:
1918: *Max Planck* – „Pentru contribuția adusă la dezvoltarea fizicii prin descoperirea cuantei de energie";
1921: *Albert Einstein* – „Pentru serviciile aduse fizicii teoretice și, mai cu seamă, pentru descoperirea legii efectului fotoelectric";
1922: *Niels Bohr* – „Pentru cercetările sale asupra structurii atomilor și a radiației emise de aceștia";
1929: *Louis de Broglie* – „Pentru descoperirea naturii ondulatorii a electronilor";
1932: *Werner Heisenberg* – „Pentru crearea mecanicii cuantice, a cărei aplicare a condus la descoperirea formelor alotropice ale hidrogenului";
1933: *Erwin Schrödinger, Paul Dirac* – „Pentru descoperirea de noi forme productive ale teoriei atomice";
1937: *Clinton Davisson, George Thomson* – „Pentru descoperirea experimentală a difracției electronilor, produsă de către cristale";
1945: *Wolfgang Pauli* – „Pentru descoperirea principiului de excluziune ce-i poartă numele (principiul Pauli)";
1954: *Max Born* – „Pentru cercetările sale fundamentale în mecanica cuantică, în special pentru interpretarea statistică a funcției de undă".
Premii Nobel au fost acordate și pentru multe alte descoperiri în care se manifestă legitățile fizicii cuantice.

## Verificați-vă cunoștințele

1. În baza cărui aspect al luminii poate fi explicat efectul fotoelectric? Dar interferența?
2. În ce constă ipoteza lui de Broglie?
3. Ce fel de experimente au confirmat faptul că electronul posedă proprietăți ondulatorii?
4. Care proprietăţi ale electronului – ondulatorii sau corpusculare – au permis construirea microscopului electronic?
5. Determinaţi lungimea de undă de Broglie asociată unui electron a cărui viteză este egală cu $10^7$ m/s.
6. Cum se modifică lungimea de undă de Broglie dacă tensiunea la care este accelerată microparticula încărcată se mărește de 4 ori?

Capitolul 6

# ELEMENTE DE FIZICĂ A ATOMULUI

## 6.1. FENOMENE ÎN CARE SE MANIFESTĂ STRUCTURA COMPUSĂ A ATOMULUI

Din cursul gimnazial de fizică cunoaşteţi că la trecerea razei de lumină monocromatică prin prisma triunghiulară transparentă, aflată în aer, raza se îndreaptă spre bază. Dacă însă pe prismă cade lumină albă, se produce ***dispersia luminii*** – lumina se descompune în raze colorate, corespunzătoare diferitor lungimi de undă. Pe ecranul pe care ele cad se obţine un tablou colorat, numit **spectru**.

Deci prisma triunghiulară permite analizarea radiaţiilor luminoase, determinarea lungimilor de undă prin descompunerea radiaţiei incidente în spectru.

**Aparatul destinat observării vizuale a spectrelor este numit *spectroscop*.**

Schema optică de principiu a acestuia este prezentată în *figura 6.1.* Radiaţia emisă de sursa de lumină *S* pătrunde în colimatorul $C_1$ prin fanta îngustă *F*, aflată în planul focal al lentilei convergente $L_1$. Ca rezultat, colimatorul formează un fascicul de raze paralele ce cade pe prisma *P*. În urma refracţiei şi dispersiei prin prismă, se propagă o totalitate de fascicule de raze paralele. Ele cad pe lentila $L_2$ a camerei $C_2$ şi, după refracţia în lentilă, razele paralele se intersectează în planul focal al acesteia. Fasciculele ce corespund diferitor lungimi de undă (culori) după trecerea prin prismă se propagă în direcţii diferite, din care cauză se intersectează în punctele respective ale planului focal al lentilei $L_2$. Aici se şi obţine spectrul ce caracterizează radiaţia emisă de sursa *S*. În *figura 6.1* sunt reprezentate razele şi spectrul obţinut în cazul a trei culori: roşu, verde şi albastru.

Isaac Newton a orientat un fascicul de lumină solară asupra prismei şi a observat pentru prima dată descompunerea lui în **spectru continuu** (*fig. V, a*, planşa color, p. 162), descoperind astfel **dispersia luminii**.

Spectrele radiaţiilor emise de diferite corpuri au fost studiate detaliat în secolul XIX. Savanţii germani – fizicianul Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) şi chimistul Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) – au studiat amănunţit spectrele emise de unele substanţe introduse în flacăra spirtierei. La temperaturile respective substanţele cercetate se aflau în stare gazoasă, erau descompuse în atomi excitaţi în urma ciocnirilor dintre ei la viteze mari. Ca rezultat, s-a constatat că spectrele radiaţiei emise de aceşti atomi sunt discontinue. Ele reprezintă un şir de linii colorate ce corespund anumitor valori ale lungimilor de undă.

**Spectrele emise de atomii excitaţi sunt numite *spectre de linii*.**

În *figura V* (planşa color, p. 162) sunt prezentate spectrele respective pentru sodiu (*b*), hidrogen (*d*) şi heliu (*f*).

Kirchhoff şi Bunsen au stabilit (a. 1859) că fiecărui tip de atomi îi corespunde un anumit spectru.

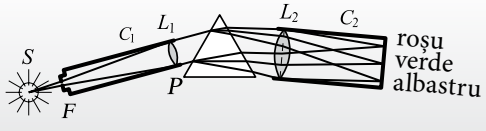



*Fig. 6.1*

După tabloul spectrului pot fi identificaţi atomii care l-au emis. Acest fapt stă la baza **analizei spectrale**. Dacă în spectrul obţinut se înregistrează linii spectrale ce nu aparţin atomilor cunoscuţi, substanţa respectivă conţine atomi ai unor elemente chimice necunoscute. Pe această cale, în anul 1868, în spectrul Soarelui a fost descoperit *heliul* (*helios* în l. greacă „soare"), care în 1895 a fost identificat în condiţii terestre.

**Spectrele emise de gazele moleculare reprezintă sisteme de linii spectrale grupate în benzi separate una de alta și sunt numite *spectre de bandă*** (*fig. V, i*, planșa color, p. 162).

**Spectrele descrise mai sus – continue, de linii și de benzi – se obţin în urma descompunerii radiaţiei emise de corpurile respective la propagarea ei prin prismă și se numesc *spectre de emisie*.**

Dacă radiaţia luminoasă emisă de un corp incandescent se propagă, înainte de a cădea pe prismă, printr-un gaz rece care nu emite lumină, atunci pe fondul spectrului continuu, observat în lipsa acestui gaz, apar linii întunecate (*fig. V*, spectrele *c, e, g, h*, planșa color, p. 162).

**Totalitatea liniilor întunecate pe fondul spectrului continuu constituie *spectrul de absorbţie*.**

Apariţia liniilor negre se explică prin absorbţia radiaţiilor cu anumite lungimi de undă de către atomii gazului traversat de radiaţia corpului incandescent. Kirchhoff a stabilit (a. 1860) că **gazele absorb radiaţii având lungimi de undă egale cu cele ale radiaţiei pe care o emit**. La suprapunerea spectrului de absorbţie pe cel de emisie ale aceluiași gaz se obţine, evident, un spectru continuu. Rezultatul obţinut de Kirchhoff este cunoscut ca **legea inversiei spectrului** sau **legea lui Kirchhoff**.

De menţionat că linii întunecate pe fondul spectrului continuu au fost observate pentru prima dată în anul 1802 de către fizicianul englez William Hyde Wollaston (1766–1828). În anii 1814–1815, fizicianul german Joseph von Fraunhofer (1787–1826) a studiat liniile întunecate din spectrul Soarelui (*fig. V, h*, planșa color, p. 162). Ulterior liniile întunecate din spectre au fost numite **linii Fraunhofer**.

Spectrele de linii sunt proprii substanţelor în stare gazoasă, adică substanţelor descompuse în atomi. Caracterul acestora, poziţia liniilor spectrale pot fi explicate doar în baza structurii interioare a atomilor.

În anii 1858–1859, investigând descărcarea electrică în gaze rarefiate, fizicianul german Julius Plücker (1801–1868) a descoperit existenţa unei radiaţii emise de catod ce se propagă perpendicular de la suprafaţa lui. În anul 1876, fizicianul german Eugen Goldstein (1850–1930) a numit aceste radiaţii **raze catodice**, iar în anul 1895 fizicianul francez Jean-Baptiste Perrin (1870–1942) a stabilit că razele catodice sunt un flux de particule încărcate cu sarcină electrică negativă. Doi ani mai târziu, în 1897, fizicianul englez Joseph John Thomson (1856–1940) a studiat mișcarea particulelor catodice în câmpuri electrice și magnetice și a determinat sarcina specifică a lor, adică raportul dintre sarcina electrică $q$ și masa lor $m$. Acest raport era de mii de ori mai mare decât respectivele rapoarte pentru ioni. Considerând sarcina electrică a particulei catodice egală în modúl cu sarcina electrică elementară, $|q| = e$, conchidem că masa ei este mult mai mică decât masa atomului de hidrogen care este cel mai ușor atom. Particula descoperită a fost numită **electron**, denumire propusă în anul 1890 de către Stoney pentru sarcina electrică elementară. Astfel, a fost descoperit electronul – primul din lanţul particulelor elementare descoperite ulterior.

Electronul este o particulă din componenţa substanţei, aceasta fiind formată din atomi cu mase mult mai mari decât a electronului. S-a concluzionat că electronii fac parte din structura atomilor, în baza căreia ar putea fi explicate spectrele de linii.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce fenomen optic se află la baza principiului de funcţionare a spectroscopului?
2. Care este caracterul spectrelor emise de atomi? Dar al celor emise de molecule?
3. Cum se explică prezenţa liniilor întunecate în spectrele de absorbţie?
4. Ce este comun pentru spectrul de emisie și pentru cel de absorbţie al unuia și aceluiași element chimic?
5. Ce concluzie, care se referă la atomi, rezultă din faptul existenţei electronului?

## 6.2. EXPERIMENTUL LUI RUTHERFORD. MODELUL PLANETAR AL ATOMULUI

După descoperirea electronului ca particulă de masă mult mai mică decât cea a atomului, fizicianul J.J. Thomson a admis că electronii intră în componenţa atomului şi a propus un model al acestuia (a. 1903). Electronul are sarcină electrică negativă, iar atomul este neutru. De aceea a considerat că atomul este o sferă având distribuită uniform în interiorul ei masa atomului, precum şi sarcina electrică pozitivă. În interiorul sferei se mai află un număr de electroni, consideraţi punctiformi, astfel încât atomul este neutru. Acest model, numit **modelul lui Thomson**, este cunoscut în istoria fizicii şi sub numele de **puding** (sau chiflă) **cu stafide**. Încercările de a explica spectrele de linii pornind de la modelul lui Thomson nu s-au încununat de succes.

Având în vedere cele menţionate, Rutherford a decis să verifice distribuţia sarcinilor electrice în atom pentru a confirma sau infirma modelul lui Thomson. În acest scop şi-a propus să bombardeze foiţe subţiri de metal cu particule α emise de substanţe radioactive (*radioactivitatea este explicată în capitolul 7*). Aici vom indica doar parametrii ce caracterizează aceste particule: masa lor este de circa 7 300 de ori mai mare decât cea a electronului ($m_\alpha \approx 7\,300\, m_e$), iar sarcina electrică a lor este pozitivă şi egală cu două sarcini electrice elementare ($q_\alpha = +2e$). În experienţă au fost folosite particule α cu energii cinetice mari, deci cu viteze mari.

Schema instalaţiei lui Rutherford este prezentată în *figura 6.2*. O sursă radioactivă (*1*) se află în interiorul unei incinte de plumb (*2*) având un canal îngust (*3*). Prin acesta iese un fascicul fin de particule α. Fasciculul cade pe o foiţă de aur (*4*), foarte subţire (circa 0,4 μm). Particulele împrăştiate de foiţă cad pe un ecran transparent (*5*), acoperit cu un strat de sulfură de zinc. În locul căderii particulei α pe sulfura de zinc se observă o **scintilaţie** – scânteiere de scurtă durată. Scintilaţia este observată prin microscop (*6*). Instalaţia permite semnalarea scintilaţiilor produse de particulele care după interacţiunea cu foiţa de aur se mişcă în direcţii ce formează diferite **unghiuri de împrăştiere** θ cu direcţia vitezei particulelor incidente pe foiţă.

În experiment a fost determinat numărul de particule α, ce au penetrat foiţa de aur, în funcţie de unghiul de împrăştiere θ. În urma observărilor minuţioase s-au constatat următoarele:

• majoritatea particulelor α ies din foiţa de aur în direcţii ce formează unghiuri destul de mici cu direcţia iniţială;

• există însă şi particule pentru care unghiul de împrăştiere θ este mai mare de 90°, la unele din ele apropiindu-se de 180°. Numărul acestora este destul de mic faţă de numărul particulelor incidente pe foiţa de aur.

Devierea considerabilă poate avea loc numai în urma unei interacţiuni cu o particulă de masă mult mai mare decât cea a particulei incidente, care este încărcată cu sarcină electrică pozitivă şi ocupă un volum mult mai mic decât cel al atomului. De aceea Rutherford a presupus că masa şi sarcina electrică pozitivă a atomului sunt concentrate într-o regiune foarte mică din centrul atomului, în **nucleu**.

Raza nucleului a fost estimată ca distanţa minimă de la centrul atomului, la care se opreşte particula α ce se mişcă direct spre nucleu fiind frânată de forţa de respingere din partea sarcinii electrice pozitive a nucleului. Cunoscând energia cinetică a particulei α la distanţe mari de nucleu, Rutherford a stabilit că diametrul nucleului este de ordinul $10^{-15}$ m, adică este de câteva zeci de mii de ori mai mic decât diametrul atomului (ultimul este de circa $10^{-10}$ m). Astfel, nucleul ocupă o părticică infimă din volumul atomului. În jurul nucleului se află electronii încărcaţi cu sarcină electrică negativă. Numărul electronilor este egal cu numărul de sarcini elementare pozitive ale nucleului şi astfel este asigurată neutralitatea atomului.

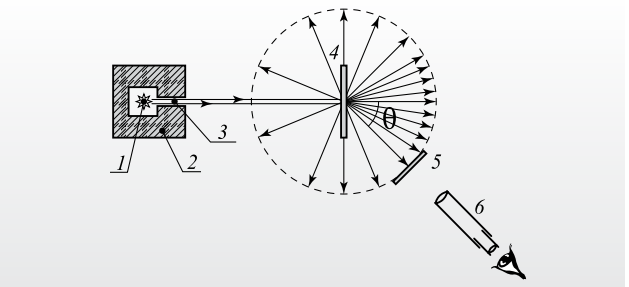



*Fig. 6.2*

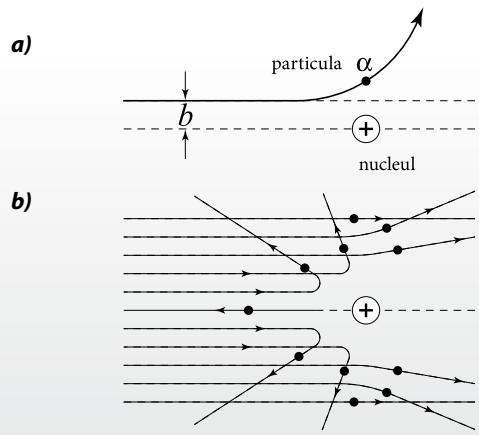
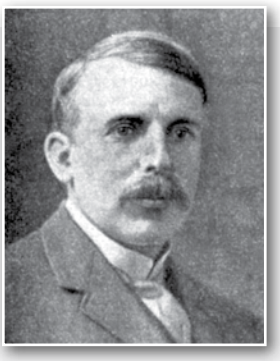



*Fig. 6.3*



ERNEST RUTHERFORD
(1871–1937)
*fizician englez*

A pus bazele teoriei moderne a radioactivității, a fondat fizica nucleului atomic.
În anul 1899 a scos în evidență două componente ale emisiei radioactive – particulele α și β. A descoperit radioactivitatea toriului și faptul că în rezultatul dezintegrării acestuia apare un element chimic nou, cu numărul de ordine 86 – radonul.
În anul 1903, împreună cu Frederick Soddy (1877–1956), a pus bazele teoriei transformărilor radioactive ale elementelor și a stabilit legea dezintegrării radioactive. A stabilit că particulele α posedă sarcină electrică pozitivă, iar apoi (a. 1909) că acestea sunt atomi de heliu dublu ionizați.
În anul 1906 Rutherford a început cercetarea sistematică a împrăștierii particulelor α la traversarea peliculelor subțiri din metale diferite. Ca rezultat, a descoperit nucleul atomic (a. 1911). Descoperind protonul (a. 1919), a demonstrat existența protonilor în componența nucleului. Rutherford a realizat prima reacție nucleară artificială (a. 1919), transformând azotul în oxigen. A prezis existența neutronului (a. 1920), descoperit în anul 1932.
În anul 1908, pentru cercetările asupra transformării elementelor în domeniul chimiei substanțelor radioactive, i s-a conferit Premiul Nobel.

Evident, electronii atomului nu se pot afla în repaus, deoarece sub acţiunea forţei de atracţie din partea nucleului ei ar cădea pe acesta. Electronii se rotesc în jurul nucleului, acceleraţia centripetă fiindu-le imprimată de forţa de atracţie electrică spre nucleu. Situaţia este analogică celei din Sistemul Solar – acceleraţia centripetă este imprimată planetelor de forţa de atracţie gravitaţională ce acţionează asupra lor din partea Soarelui. Datorită acestei analogii dintre mişcarea electronilor în jurul nucleului şi cea a planetelor în jurul Soarelui, modelul respectiv al atomului a fost numit **model planetar** sau **nuclear**. El este cunoscut şi ca **modelul lui Rutherford**.

Să analizăm în baza acestui model împrăştierea particulelor α. Notăm cu $b$ – **parametrul de ciocnire** – distanţa minimă la care ar trece particula α pe lângă nucleu dacă ea s-ar mişca rectiliniu (*fig. 6.3, a*). Majoritatea particulelor α se deplasează pe lângă nuclee la distanţe mult mai mari decât diametrul lor. Acţiunea forţelor electrice asupra acestor particule este nesemnificativă; ele, practic, nu deviază de la mişcarea rectilinie. Devierile de la mişcarea rectilinie sunt considerabile pentru un număr mic de particule care trec prin vecinătatea nemijlocită a nucleului (*fig. 6.3*, *b*).

În baza modelului nuclear nu s-a reuşit calcularea lungimilor de undă ce corespund liniilor observate în spectru. Problema explicării spectrelor de linii rămânea nesoluţionată.

Esenţială era însă o altă problemă. Existenţa modelului planetar al atomului se afla în contradicţie cu legităţile fizicii clasice. În cadrul teoriei câmpului electromagnetic, elaborată de Maxwell, se demonstrează că particula încărcată electric, mişcându-se accelerat, emite unde electromagnetice, respectiv, şi energie. Mişcarea electronului în jurul nucleului nu este rectilinie uniformă, deci el posedă acceleraţie. În consecinţă, electronul emite unde electromagnetice, pierde treptat din energia sa, se apropie tot mai mult de nucleu şi, în final, cade pe el. Calculele au arătat că electronul, care se rotea în jurul nucleului, trebuia să cadă pe acesta în doar circa $10^{-8}$ s. În realitate însă atomii rămân stabili.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Pot oare electronii să modifice traiectoriile rectilinii ale particulelor $\alpha$? Argumentaţi răspunsul.
2. Ce prezintă modelul atomului propus în baza studierii împrăștierii particulelor $\alpha$ la interacţiunea cu foiţe metalice?
3. Care probleme n-au putut fi rezolvate în baza modelului planetar al atomului?

# 6.3. MODELUL ATOMULUI DUPĂ BOHR

## a. Postulatele lui Bohr

Fizicianul danez Niels Bohr (1885–1962) a elaborat o teorie a atomului, punând la baza ei două postulate.

**Postulatul întâi (*postulatul stărilor staţionare*)** – atomul poate exista numai în anumite stări staţionare, în care nu emite şi nu absoarbe unde electromagnetice.

Acest postulat este în contradicţie cu electrodinamica clasică şi contestă aplicarea acesteia la sisteme atomice – electronul din atom posedă acceleraţie, dar nu emite unde electromagnetice.

În fiecare stare staţionară atomul posedă o energie bine determinată, numită, de regulă, **energie admisă**. Valorile acestor energii formează un şir discret: $E_1, E_2, \ldots, E_n \ldots$ . Numărul întreg $n$ care determină energia atomului este numit **număr cuantic principal**. S-a convenit a ordona valorile energiei admise, astfel încât ele să crească pe măsură ce valorile lui $n$ devin tot mai mari: $E_1 < E_2 < E_3 < \ldots$ . Starea atomului în care energia lui are valoarea minimă $E_1$ este numită **stare fundamentală** sau **normală**, stările cu energii mai mari $E_2, E_3, \ldots$ sunt numite **stări excitate**. Starea fundamentală este stabilă, deci acest postulat constată stabilitatea modelului planetar al atomului. Astfel, pentru prima dată în fizică s-a admis că energia, în cazul de faţă a atomului, este o mărime discretă.

**Postulatul al doilea (*regula frecvenţelor*)** – la trecerea dintr-o stare staţionară în alta atomul emite sau absoarbe o cuantă de energie egală cu diferenţa dintre energiile atomului în aceste stări:

$$h\nu = E_n - E_m. \qquad (6.1)$$

În cazul dat $E_n$ şi $E_m$ sunt energiile atomului în stările staţionare. Dacă $E_n$ este energia în starea iniţială, mai mare decât energia $E_m$ în starea finală, relaţia (6.1) determină energia (frecvenţa) fotonului (cuantei de energie) emis. În cazul în care însă $E_n$ este energia atomului în stare finală, mai mare decât energia lui $E_m$ în stare iniţială, relaţia (6.1) exprimă energia fotonului absorbit.

Modelul atomului ce are la bază aceste postulate este numit **modelul cuantificat al lui Bohr** sau, simplu, **modelul Bohr**.

Pentru a imprima un caracter intuitiv celor expuse, se foloseşte **schema nivelurilor energetice**. S-a convenit a orienta axa energiilor vertical în sus şi a marca pe ea valorile energiilor admise. În dreptul fiecărei valori se trasează o linie orizontală – **nivelul energetic**. Astfel, s-a obţinut schema nivelurilor energetice (*fig. 6.4*). Nivelul inferior este **nivelul fundamental**, celelalte niveluri sunt **excitate**.

În schema menţionată trecerea atomului dintr-o stare în alta, numită **tranziţie cuantică**, este reprezentată printr-un segment vertical ce uneşte nivelurile respective, a cărui săgeată indică nivelul (starea) final(ă). De exemplu, săgeata *a* (*fig. 6.4*) indică tranziţia de pe nivelul 2 pe nivelul 1 (din starea cu energia $E_2$ în cea cu energia $E_1$) cu emisia fotonului, a cărui energie $h\nu = E_2 - E_1$. Săgeata *b* corespunde tranziţiei de pe nivelul 2 pe nivelul 4 cu absorbţia fotonului, a cărui energie $h\nu' = E_4 - E_2$. În *figura 6.4* prin săgeţi ondulate sunt prezentaţi şi fotonii respectivi, care, de obicei, nu sunt indicaţi.

## b.* Atomul de hidrogen în cadrul teoriei lui Bohr

Bohr a aplicat postulatele la elaborarea teoriei celui mai simplu atom – a celui de hidrogen. Pentru

aceasta a propus următorul model: în centrul atomului se află în repaus un nucleu masiv, încărcat cu sarcina electrică pozitivă (+*e*), în jurul căruia se rotește pe orbită circulară un electron cu sarcină negativă (–*e*). Notăm raza orbitei cu *r*, viteza electronului – cu *v* (*fig. 6.5*).

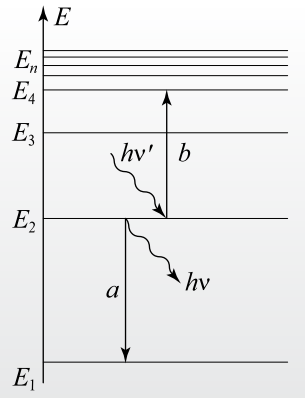



*Fig. 6.4*

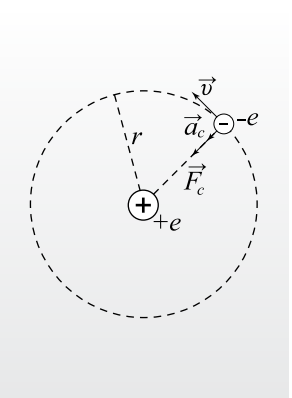
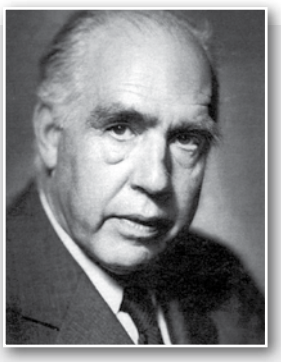



*Fig. 6.5*



NIELS HENRIK DAVID BOHR
(1885–1962)

*ilustru fizician-teoretician danez, unul dintre fondatorii fizicii moderne*

Primele cercetări au fost consacrate comportării electronilor în metale. După vizitarea în anii 1911–1912 a laboratoarelor lui J.J. Thomson și E. Rutherford și familiarizarea cu cercetările acestora în domeniul fizicii atomului, a formulat postulate în baza cărora a elaborat teoria atomului, ce i-a permis să explice spectrul de linii al hidrogenului atomar. În anul 1918 a expus principiul de corespondență, ce stabilește condițiile în care rezultatele cunoscute în fizica clasică pot fi obținute din formulele utilizate în fizica cuantică. Bohr a obținut rezultate importante în teoria nucleului atomic. Este autorul teoriei nucleului intermediar, numit și compus (a. 1933), a dezvoltat modelul „picătură" al nucleului atomic (a. 1936) propus de către George Anthony Gamow (1904–1968). În baza acestui model, împreună cu John Archibald Wheeler (1911–2008), a elaborat teoria fisiunii nucleare și a prezis fisiunea spontană a nucleelor de uraniu (a. 1939). I s-a decernat Premiul Nobel în domeniul fizicii (a. 1922) „pentru merite în studierea structurii atomului".

Pornind de la acest model, Bohr trebuia să explice spectrul de linii al hidrogenului atomar. O importanță deosebită la soluționarea acestei probleme a avut familiarizarea lui cu formula empirică, stabilită de către savantul elveţian Johann Jakob Balmer (1825–1898). Cunoscând valorile experimentale ale lungimilor de undă ce corespund liniilor din regiunea vizibilă a spectrului hidrogenului atomar, Balmer a reușit să le unească într-o formulă (a. 1885). Formula pentru frecvențele respective este:

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), \text{ unde } n = 3, 4, 5, \ldots, \quad (6.2)$$

și constanta *R*, numită constanta lui Rydberg:

$$R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}. \quad (6.3)$$

Bohr a hotărât să deducă această formulă în cadrul teoriei atomului. După câțiva ani de la elaborarea teoriei, Bohr a recunoscut: „De cum am văzut formula lui Balmer, totul mi-a devenit clar". El deja cunoștea rezultatul pe care trebuia să-l obțină.

Primul postulat al lui Bohr afirma existența în atom a stărilor staționare ale atomului. Pentru a elabora teoria unui atom concret, era necesară formularea unei reguli care ar pune în evidență aceste stări.

Regula respectivă conținea noțiunea de **moment cinetic**, numit și **moment al impulsului**. El se definește prin analogie cu momentul forței. Dacă *F* este forța și *d* brațul ei (distanța dintre dreapta-suport a forței și punctul față de care se calculează acest moment), momentul forței $M = F \cdot d$.

Momentul cinetic *L* este produsul dintre impulsul corpului $p = mv$ și brațul lui $d_0$. Avem $L = pd_0 = mvd_0$. În cazul electronului din atomul de hidrogen brațul impulsului lui este egal cu raza orbitei. Astfel, momentul impulsului devine:

$$L = m_e vr, \quad (6.4)$$

unde $m_e$ este masa electronului.

Pentru obținerea rezultatului scontat Bohr a admis că:

> momentul impulsului electronului din atomul de hidrogen poate lua doar anumite valori discrete, egale cu un număr întreg ***n*** de constante ale lui Planck ***h*** împărțite la 2π.

Adică:

$$m_e v r = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \ldots . \qquad (6.5)$$

Relaţia (6.5) este numită **regula de cuantificare a lui Bohr**. Ea pune în evidenţă orbitele staţionare dintre toate orbitele imaginare ale electronului în atomul de hidrogen.

Existenţa proprietăţilor ondulatorii ale electronilor permite o altă interpretare a regulii (6.5). Exprimăm din (5.15) impulsul electronului $m_e v = h/\lambda$ şi substituim această valoare în (6.5). Obţinem $\frac{h}{\lambda} r = n\frac{h}{2\pi}$,

$$2\pi r = n\lambda, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \ldots . \qquad (6.6)$$

Prin urmare, regula de cuantificare a lui Bohr poate fi reformulată astfel:

**orbitele staţionare ale electronului în atomul de hidrogen sunt orbitele circulare care au lungimi egale cu un număr întreg de lungimi de undă de Broglie** (*fig. 6.6*).

Mişcându-se pe orbita circulară în jurul nucleului, electronul posedă acceleraţia centripetă $a_c = \frac{v^2}{r}$. Aceasta este imprimată de forţa coulombiană de atracţie a electronului spre nucleu: $F_c = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. În acord cu principiul fundamental al dinamicii, $m_e a_c = F_c$, obţinem:

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}. \qquad (6.7)$$

Din relaţiile (6.5) şi (6.7) pentru razele orbitelor şi vitezele electronului pe ele obţinem expresiile:

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e e^2}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \ldots, \qquad (6.8)$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 h n}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \ldots . \qquad (6.9)$$

Observăm că raza orbitei (6.8) şi viteza electronului (6.9) capătă numai valori discrete, determinate de numărul întreg $n$, care marchează mărimile respective ca indice.

Raza primei orbite ($n = 1$) a electronului în atomul de hidrogen este numită **raza Bohr** şi are valoarea:

$$r_1 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 5{,}29 \cdot 10^{-11}\,\text{m}. \qquad (6.10)$$

Această valoare concordă cu valorile experimentale ale razelor atomilor.

Expresia (6.9) arată că viteza electronului este mai mică la mişcarea pe orbite mai îndepărtate de nucleu.

Să calculăm şi energia electronului în atomul de hidrogen. Ea se compune din energia cinetică $E_c = \frac{m_e v^2}{2}$ şi energia potenţială $E_p$ a electronului în câmpul electric al nucleului. Ultima este egală cu produsul dintre sarcina electronului ($-e$) şi potenţialul câmpului electric $\varphi$ al nucleului la distanţa $r$ de la el. Considerând nucleul sarcină punctiformă, aplicăm pentru $\varphi$ formula cunoscută din electrostatică $\varphi = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 r}$. Atunci $E_p = (-e)\,\varphi = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

Ţinând seama de expresiile (6.8) şi (6.9), pentru energia totală $E = E_c + E_p$ obţinem

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \ldots . \qquad (6.11)$$

Numărul întreg $n$ determină valoarea energiei electronului în atomul de hidrogen şi este numit **număr cuantic principal**. Acesta determină, de asemenea, după cum am văzut mai sus, momentul cinetic orbital al electronului în atom, raza orbitei şi viteza lui pe orbită.

Expresia (6.11) arată că energia $E_n$ este negativă. Aceasta reflectă faptul că electronul se află în atom în stare legată. Pentru a ioniza atomul, adică pentru a îndepărta electronul din el, trebuie consumată o anumită energie minimă. Electronul îndepărtat din atom nu mai interacţionează cu acesta, energia

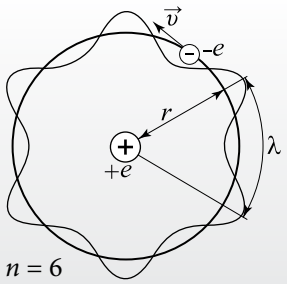



*Fig. 6.6*

potenţială a lui devine nulă. Energia electronului în atom este mai mică, deci negativă.

În starea fundamentală ($n = 1$) energia atomului este minimă şi egală cu:

$$E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = -2{,}17 \cdot 10^{-18}\,\text{J} = -13{,}5\,\text{eV}. \quad (6.12)$$

**Energia de ionizare a atomului de hidrogen este egală cu energia minimă necesară pentru a îndepărta electronul din atom.**

În afara atomului energia electronului este nulă, deci energia de ionizare $E_{ion} = 0 - E_1 = |E_1| = 13{,}5$ eV, valoare ce concordă cu cea determinată experimental.

Substituind în regula frecvenţelor (6.1) expresiile (6.11) pentru energiile $E_n$ şi $E_m$, unde $n > m$, obţinem frecvenţa fotonului emis:

$$\nu_{nm} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right). \quad (6.13)$$

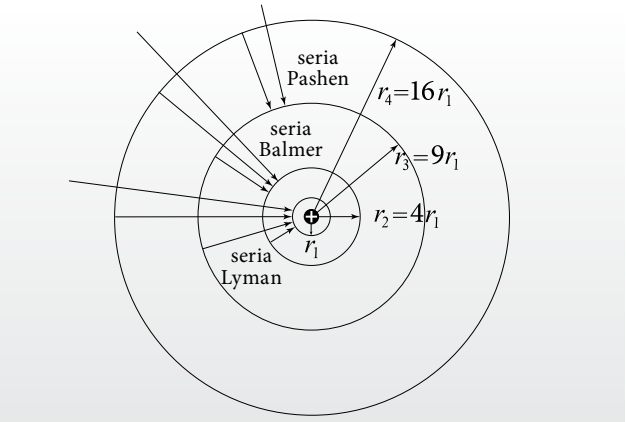



*Fig. 6.7*

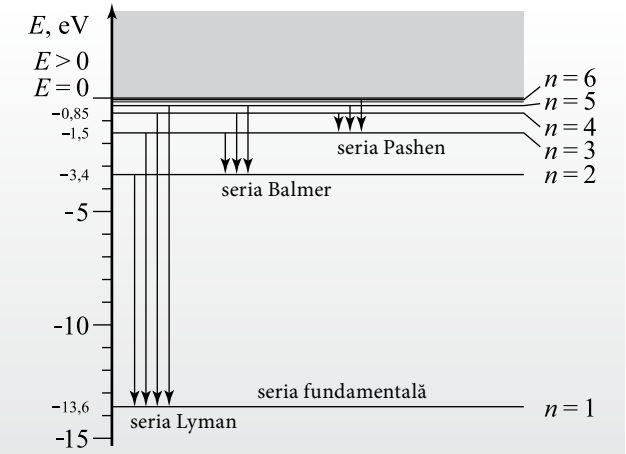



*Fig. 6.8*

Introducem constanta lui Rydberg:

$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = 3{,}29 \cdot 10^{15}\,s^{-1}. \quad (6.14)$$

Valoarea ei calculată în baza teoriei lui Bohr coincide cu valoarea experimentală (6.3). Formula (6.13) capătă forma:

$$\nu_{nm} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right). \quad (6.15)$$

Aceasta este **formula generalizată a lui Balmer**. Pentru $m = 2$ ea coincide cu formula (6.2) stabilită de acesta pe cale experimentală.

Liniile spectrale ce corespund unei valori anumite a numărului cuantic $m$, adică tranziţiilor din stări cu energii mai mari $E_n$ în starea cu energie $E_m$, formează o **serie spectrală**. Liniile seriei se obţin considerând pentru numărul $n$ valorile $(m + 1)$, $(m + 2)$, … .

Pentru $m = 1$ obţinem seria Lyman, situată în regiunea ultravioletă a spectrului, iar pentru $m = 2$ seria deja cunoscută a lui Balmer în regiunea vizibilă. Următoarele serii se află în regiunile roşie şi infraroşie şi poartă numele savanţilor Pashen ($m = 3$), Bracket ($m = 4$), Pfund ($m = 5$), Humphry ($m = 6$). După cum rezultă din formula (6.15), frecvenţele fiecărei serii spectrale sunt mai mici decât ale celei precedente.

Să reprezentăm schematic rezultatele obţinute. În *figura 6.7* sunt indicate: orbita de rază $r_1$ (corespunde stării fundamentale) şi orbitele ce corespund stărilor excitate ($n = 2, 3, 4$) în conformitate cu formula (6.8) pentru raze. Cu segmente orientate sunt indicate tranziţiile cuantice dintre orbitele stărilor staţionare pentru primele linii din seriile Lyman, Balmer şi Pashen.

În *figura 6.8* sunt prezentate nivelul fundamental ($n = 1$) şi câteva niveluri excitate, în acord cu formula (6.11). În această figură, prin segmente orientate, sunt indicate tranziţiile cuantice corespunzătoare seriilor din *figura 6.7*.

Astfel, Bohr a reuşit nu numai să explice caracterul de linii al spectrului hidrogenului atomar, ci şi să obţină gruparea lor în serii, să calculeze frecvenţele respective. Rezultatele obţinute în cadrul teoriei lui Bohr concordă perfect cu datele experimentale. Acesta a fost un succes al primei teorii cuantice a atomului.

Teoria lui Bohr a avut şi unele deficienţe. Nu s-a reuşit să se calculeze frecvenţele liniilor spectrale ale heliului, atom cu doar doi electroni, nemaivorbind de cele ale atomilor cu mai mulţi electroni. Chiar şi în

cazul hidrogenului nu au fost calculate intensităţile liniilor spectrale, adică nu s-a explicat care linii spectrale sunt mai luminoase şi care mai întunecate.

Toate acestea din cauză că teoria lui Bohr nu este consecventă în relaţia sa cu fizica clasică. Pe de o parte, este folosit principiul fundamental al dinamicii, expresiile pentru acceleraţia centripetă şi energia cinetică, pe de altă parte, este contestată aplicabilitatea electrodinamicii lui Maxwell în lumea atomilor. Din această cauză teoria lui Bohr este considerată o teorie de tranziţie: **semiclasică** sau **semicuantică**.

În anii ’20 ai secolului trecut a fost elaborată mecanica cuantică modernă care explică toate problemele ce nu şi-au găsit soluţionarea în teoria lui Bohr.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care concluzie a electrodinamicii lui Maxwell se află în contradicţie cu teoria lui Bohr?
2. Ce modificare importantă care se referă la energie rezultă din primul postulat al lui Bohr?
3. Care stare a atomului este numită fundamentală?
4. Care stări sunt numite excitate?
5. Cum explică teoria lui Bohr emisia radiaţiei de către atomi?
6. Ce prezintă schema nivelurilor energetice?
7. Care tranziţii cuantice sunt însoţite de absorbţia fotonilor?
8.* Care mărimi ce caracterizează starea electronului în atomul de hidrogen au valori discrete?
9.* Ce prezintă seriile spectrale ale hidrogenului atomar? Prin ce diferă unele de altele?
10. Un atom trece din starea cu energia de (–1,51) eV în starea cu energia egală cu (–3,40) eV. Calculaţi frecvenţa şi lungimea de undă a fotonului emis.
11.* Să se determine frecvenţa şi lungimea de undă a fotonului emis de atomul de hidrogen la tranziţia din starea cu numărul cuantic $n = 4$ în starea cu numărul cuantic $m = 2$.

## 6.4.* EMISIA STIMULATĂ A RADIAŢIEI. LASERUL

Cuvântul **laser** astăzi face parte din limbajul nostru uzual. Aceasta se datorează multiplelor sale aplicaţii, de la confecţionarea compact-discurilor şi citirea informaţiei de pe ele la realizarea efectelor luminoase ce însoţesc concertele unor formaţii muzicale, la utilizarea în calitate de bisturiu pentru efectuarea unor intervenţii chirurgicale ş.a.

Laserul este un dispozitiv din categoria generatoarelor cuantice de radiaţie electromagnetică. Primul generator cuantic a fost construit în anul 1954 de către Nikolai Basov (1922–2001) şi Aleksandr Prohorov (1916–2002) în Uniunea Sovietică, independent şi simultan cu Charles Hard Townes (1915–2015) în SUA. În 1964 toţi au devenit laureaţi ai Premiului Nobel. Dispozitivul respectiv genera unde electromagnetice cu lungimea de undă egală cu 1,27 cm (domeniul microundelor) şi a fost numit **maser** (cuvântul reprezintă o abreviere a expresiei din limba engleză *Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* – amplificarea microundelor prin emisia stimulată a radiaţiei). În anul 1960, fizicianul american Theodore Harold Maiman (1927–2007) a inventat **laserul** cu rubin, care emite lumină roşie cu lungimea de undă egală cu 694,3 nm. Denumirea laser este formată din primele litere ale expresiei *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* – amplificarea luminii prin emisia stimulată a radiaţiei.

Pentru a expune principiul de funcţionare a generatoarelor cuantice, vom analiza, mai întâi, procesele de absorbţie şi de emisie a fotonilor (undelor electromagnetice) de către atomi. În conformitate cu postulatul al doilea al lui Bohr (*tema 6.3, a*), aceste procese se produc la trecerea electronului de pe un nivel energetic pe altul (*fig. 6.4*). Aici vom reprezenta în figuri starea sistemului până la tranziţia dintr-o stare în alta şi după aceasta (*fig. 6.9–6.11*, unde electronul este reprezentat printr-un punct negru).

Notăm cu $E_1$ energia nivelului fundamental şi cu $E_2$ energia unui nivel excitat ($E_2 > E_1$). Tranziţiei cuantice, între aceste niveluri, îi corespunde fotonul cu energia $h\nu_{21} = E_2 - E_1$.

Dacă atomul se află în starea cu energia $E_1$ (electronul pe nivelul $E_1$) şi asupra lui cade un foton cu energia $h\nu_{21}$ (*fig. 6.9, a*), atomul absoarbe fotonul şi trece în starea cu energia $E_2$ (*fig. 6.9, b*).

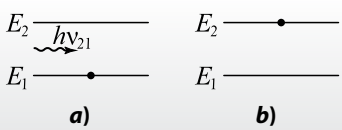



*Fig. 6.9*

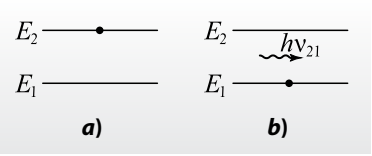



*Fig. 6.10*

Atomul în stare excitată ($E_2$) este instabil, are o viaţă medie de ordinul $10^{-8}$ s. El trece spontan, fără vreo influenţă din exterior, în starea fundamentală ($E_1$) şi emite un foton cu energia $h\nu_{21}$ (*fig. 6.10, a, b*). Aceasta este **emisia spontană** a radiaţiei.

Diferiţi atomi excitaţi emit spontan, independent unul de altul, fotoni între care nu există nicio concordanţă cât priveşte direcţia de propagare, faza oscilaţiilor sau polarizarea. Situaţia dată se realizează în sursele obişnuite de lumină necoerentă.

În anul 1917, Albert Einstein a argumentat existenţa unei alte modalităţi de emisie a radiaţiei – **emisia stimulată (indusă)**.

Să analizăm un atom excitat (electronul pe nivelul $E_2$) şi un foton cu energia $h\nu_{21}$ apropiindu-se de acest atom (*fig. 6.11, a*). Fotonul influenţează electronul de pe nivelul excitat şi stimulează trecerea lui pe nivelul fundamental ($E_1$) cu emisia unui foton al cărui energie este egală, de asemenea, cu $h\nu_{21}$ (*fig. 6.11, b*). S-a constatat că fotonul astfel emis este caracterizat de aceiaşi parametri ca şi cel incident: direcţie de propagare, frecvenţă, fază, polarizare. Putem spune că fotonul emis este „clonă" a celui incident.

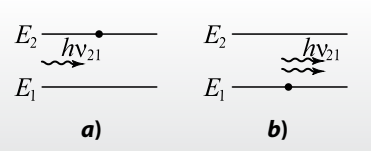



*Fig. 6.11*

În starea obişnuită a corpurilor majoritatea atomilor se află în stare fundamentală. Dacă pe corp cade un fascicul de fotoni, o parte din ei sunt absorbiţi, atomii trec în stare excitată şi, după un timp, emit spontan fotoni în direcţii diverse şi cu parametri diferiţi. Are loc împrăştierea luminii, intensitatea fasciculului se micşorează pe măsură ce el parcurge o distanţă mai mare în corp. Datorită duratei mici a vieţii atomilor în stare excitată, emisia stimulată are loc la un număr nesemnificativ de atomi şi nu compensează pierderile de fotoni din fascicul în urma absorbţiei.

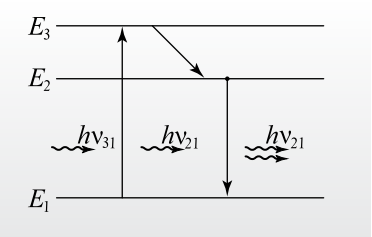



*Fig. 6.12*

Emisia stimulată ar prevala-o pe cea spontană, dacă atomii s-ar afla timp mai îndelungat în stare excitată. Astfel de stări excitate au fost descoperite, ele fiind numite **metastabile** şi caracterizate de vieţi medii de circa $10^{-3}$ s, adică de zeci şi sute de mii de ori mai mari decât viaţa medie a atomilor în stări excitate obişnuite. În lasere se utilizează substanţe ale căror particule pot exista în stări de acest fel.

Să analizăm funcţionarea **laserului cu rubin**. Rubinul reprezintă un cristal de oxid de aluminiu $Al_2O_3$, în care o parte din atomii de aluminiu (circa 0,05%) sunt înlocuiţi cu atomi de crom (ioni $Cr^{3+}$), una din stările excitate ale cărora este metastabilă. Notăm cu $E_1$ energia atomului de crom în stare fundamentală şi cu $E_2$ şi $E_3$, unde $E_2 < E_3$, energiile atomului în două stări excitate, dintre care starea cu energia $E_2$ este metastabilă (*fig. 6.12*). Acest **sistem cu trei niveluri** se află la baza principiului de funcţionare a unor lasere.

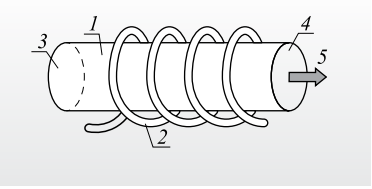



*Fig. 6.13*

Pe un cilindru din rubin (*1*) este înfăşurat un tub spiralat (*2*) de descărcare electrică în gaz (de obicei, xenon). Bazele cilindrului sunt perpendiculare pe axa lui, una din ele (*3*) reprezintă o oglindă, iar a doua (*4*) – o oglindă semitransparentă (*fig. 6.13*). Distanţa dintre oglinzi este egală cu un număr întreg de semilungimi de undă, astfel încât între ele se formează unde staţionare. Sistemul de oglinzi reprezintă **un rezonator optic**.

Descărcarea electrică a lămpii cu xenon este însoţită de un impuls puternic de lumină, astfel încât o parte din atomii de crom absorb fotoni cu energia $h\nu_{31}$ şi trec în stare excitată, a cărei energie este egală cu $E_3$ (*fig. 6.12*). Această fază a funcţionării laserului este numită **pompaj optic**.

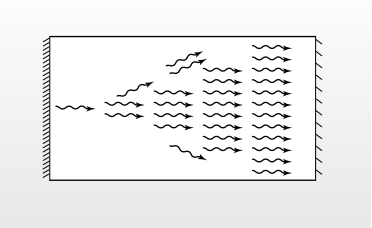


*Fig. 6.14*

Din starea nestabilă cu energia $E_3$ atomul de crom trece în cea cu energia mai mică $E_2$, diferenţa dintre energii ($E_3 - E_2$) fiind transmisă

atomilor sub formă de energie cinetică. Ca rezultat, energia internă a cristalului se amplifică, el se încălzește, din care cauză laserele de intensitate mare sunt prevăzute cu sisteme de răcire.

După tranziția $E_3 \to E_2$ un număr mare de atomi se află în stare metastabilă și pot să treacă în stare fundamentală. Cristalul este pregătit pentru emisia stimulată și prezintă un **mediu activ**.

Întâmplător, un atom trece din starea metastabilă în cea fundamentală cu emisia unui foton de energie $h\nu_{21}$ (*fig. 6.12*). Deplasându-se prin cristal, acesta provoacă emisia stimulată a unui atom aflat în stare metastabilă. Prin urmare, prin cristal se deplasează doi fotoni cu proprietăți identice. Ei provoacă apoi emisia stimulată încă a doi fotoni etc. După fiecare etapă, numărul de fotoni se dublează, în cristal se produce o avalanșă de fotoni cu aceiași parametri (*fig. 6.14*). Dacă avalanșa formează un unghi cu axa cristalului, ea va ieși prin suprafața laterală a acestuia și se va întrerupe.

Altă situație este în cazul avalanșei ce se propagă paralel cu axa cristalului. Oglinzile de la capătul cristalului o reflectă de multe ori, ea parcurge o distanță mare, numărul de fotoni din avalanșă crescând permanent. Prin oglinda semitransparentă (*4*) iese un fascicul intens de fotoni (*fig. 6.13*) – fasciculul laser (*5*). Laserul cu rubin funcționează în regim de impulsuri, fiecare fiind inițiat de descărcarea electrică a lămpii cu xenon.

În anii ce au urmat după descoperirea laserului cu rubin au fost construite noi tipuri de lasere: **lasere cu gaz** care funcționează în regim continuu, **lasere cu semiconductoare** și **lasere cu coloranți organici**, o particularitate a ultimelor este posibilitatea de a modifica frecvența radiației emise.

Remarcăm proprietățile fasciculului laser:

– **monocromatismul**, condiționat de faptul că undele electromagnetice sunt emise în urma tranziției cuantice dintre două niveluri energetice bine determinate ale atomilor;

– **coerența**, care este o proprietate a emisiei stimulate;

– **direcționalitatea**, adică gradul înalt de paralelism al razelor ce formează fasciculul, este condiționată de amplificarea numai a undelor de lumină ce se propagă perpendicular pe oglinzile rezonatorului optic. Gradul de paralelism poate fi ilustrat prin faptul că un fascicul laser transmis de pe Pământ spre Lună formează pe suprafața acesteia un spot luminos cu diametrul de circa 3 km (distanța Pământ–Lună este de aproximativ 380 000 km);

– **intensitatea foarte mare.** Laserele sunt surse artificiale de lumină cu cea mai mare putere. La unele tipuri de lasere se obțin (pe parcursul unor intervale mici de timp) puteri ale radiației de circa $10^{14}$ W/cm$^2$, mult mai mari decât puterea radiației Soarelui – $7 \cdot 10^3$ W/cm$^2$.

Aplicațiile laserelor sunt diverse, unele din ele fiind deja menționate la începutul temei. Fascicule laser de intensitate foarte mare se utilizează la tăierea, perforarea, sudarea și topirea metalelor, iar prin evaporarea lor în vid se obțin metale de o puritate deosebită. Aceste fascicule se folosesc la transmiterea informației prin fibre optice: printr-un cablu optic pot fi transmise simultan până la un miliard de convorbiri telefonice și emisiuni muzicale sau un milion de emisiuni televizate.

Laserele sunt folosite în geodezie, unde cu ajutorul lor se măsoară distanțe și unghiuri dintre anumite direcții, se trasează direcțiile în cazul construcțiilor subterane. Astfel, laserul a fost folosit la construirea canalului de sub strâmtoarea La Manche, canal ce unește Franța și Marea Britanie.

Folosirea laserelor a contribuit la lărgirea cunoștințelor despre atmosferă și structura suprafețelor unor planete, determinarea mai exactă a caracteristicilor mișcării lor. Locatoarele cu lasere permit să se stabilească distribuția impurităților în atmosferă în funcție de înălțime, vitezele curenților de aer și componența atmosferei.

Descoperirea laserelor a condus la apariția unor domenii noi ale fizicii, ca **holografia** și **optica neliniară**. Laserele se utilizează tot mai frecvent în cercetările din domeniul fizicii nucleare, inclusiv la realizarea reacției termonucleare dirijate, precum și în tehnică, în viața cotidiană.

## Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă emisia stimulată a radiației? Prin ce se deosebește ea de emisia spontană?
2. Care stări excitate ale atomilor sunt numite metastabile? Prin ce diferă ele de alte stări excitate?
3. Ce reprezintă sistemul cu trei niveluri?
4. Prin ce este important pompajul optic?
5. Care sunt proprietățile fasciculului laser?
6. Ce proprietate a fasciculului este folosită în geodezie?
7. Scrieți un referat cu tema: „Aplicații practice ale laserelor în…" (domeniul concret – la alegere).

Capitolul 7

# ELEMENTE DE FIZICĂ A NUCLEULUI ATOMIC. PARTICULE ELEMENTARE

## 7.1. NUCLEUL ATOMIC: CARACTERISTICILE FIZICE ȘI STRUCTURA

Descoperirea electronului de către J.J. Thomson în 1897 a spulberat mitul despre indivizibilitatea atomului. În 1911, E. Rutherford a descoperit nucleul atomic. Problema indivizibilităţii nucleului devenise una stringentă: este acesta un tot întreg, fără structură internă sau reprezintă un sistem compus din particule separate?

Să analizăm mărimile fizice ce caracterizează nucleul: **sarcina electrică, masa** și **raza lui**.

Cunoaşteţi deja (*tema 6.2*) că nucleul atomului este încărcat cu sarcină electrică pozitivă. Ea este egală cu produsul dintre numărul de ordine $Z$ al elementului în tabelul periodic al elementelor chimice și sarcina electrică elementară $e$:

$$Q_{nucl} = +Ze. \qquad (7.1)$$

$Z$ este numit **număr atomic** (uneori și **număr de sarcină**).

Justeţea acestei relaţii a fost confirmată convingător în 1913 de către fizicianul englez Henry Gwin Jeffreys Moseley (1887–1915). El bombarda substanţa cercetată cu un fascicul de electroni accelerați până la viteze destul de mari, astfel încât aceştia să pătrundă în interiorul atomului până aproape de nucleul lui. În urma ciocnirilor cu electronii din vecinătatea nucleului, din atomi erau eliminaţi electronii de pe nivelurile energetice inferioare. Trecerea ulterioară a electronilor de pe nivelurile superioare pe cele inferioare, rămase libere, era însoţită de emisia radiaţiei electromagnetice, a cărei frecvenţă depinde de sarcina electrică a nucleului. Moseley a stabilit relaţia dintre frecvenţă și numărul atomic, cunoscută ca **legea lui Moseley**. În baza ei a fost confirmată relaţia (7.1), stabilindu-se sensul fizic al numărului de ordine $Z$ al elementului în sistemul periodic. S-a constatat că $Z$ este numărul de sarcini elementare ce formează sarcina nucleului.

Din cauza prezenţei învelișurilor electronice, masele nucleelor nu pot fi determinate nemijlocit. De aceea se stabilesc experimental masele ionilor, iar apoi se calculează masele nucleelor, ţinând seama de numerele de electroni din ionii respectivi. Pentru a determina masele ionilor, se utilizează, de obicei, **spectrografele de masă** (principiul funcţionării lor a fost expus în *capitolul 1, tema 1.4*).

Masele nucleelor se exprimă în unităţi atomice de masă (u), ca și masele atomilor și ale moleculelor. Această unitate este definită ca 1/12 din masa atomului de carbon (ulterior definiţia va fi precizată). Relaţia dintre unitatea atomică de masă și kilogram – unitatea fundamentală pentru masă în SI – este:

$$1\ \text{u} = 1{,}66005656 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}.$$

În calcule se utilizează valoarea aproximativă $1\ \text{u} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg.

**Numărul întreg apropiat de valoarea numerică a masei nucleului exprimată în unităţi atomice de masă se numește *număr de masă* (*A*).**

Conform definiţiei, numărul de masă este adimensional, iar masa atomului – egală cu $A$u.

Diametrul nucleului atomic a fost estimat de către Rutherford în baza datelor obţinute la studierea împrăștierii particulelor α (*tema 6.2*). Rutherford a stabilit că razele nucleelor sunt de ordinul $10^{-15}$–$10^{-14}$ m.

Între raza nucleului şi numărul lui de masă există o relaţie simplă. Dacă se consideră densitatea materiei nucleare constantă, atunci volumul nucleului este proporţional cu masa lui: $V \sim m$. Volumul $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, unde $R$ este raza nucleului, considerat de formă sferică. Masa lui este direct proporţională cu numărul de masă $A$, adică $m \sim A$. Prin urmare, $\frac{4}{3}\pi R^3 \sim A$, deci $R \sim A^{1/3}$. Trecând la egalitate, avem:

$$R = aA^{1/3}. \qquad (7.2)$$

Parametrul $a$ are valori în intervalul $(1{,}2 - 1{,}4) \cdot 10^{-15}$ m.

Să estimăm şi densitatea materiei nucleare. Masa nucleului este egală cu $A$ u, volumul lui cu $\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^3 A$. Pentru densitate obţinem $\rho_{nucl} = \frac{A\,\text{u}}{4\pi a^3 A/3} = \frac{3\,\text{u}}{4\pi a^3}$. Efectuând calculele, avem $\rho_{nucl} \approx 2 \cdot 10^{17}$ kg/m$^3$. Aceasta este o valoare destul de mare. Pentru masa 1 cm$^3$ de materie nucleară obţinem valoarea: $2 \cdot 10^{17}$ kg/m$^3 \cdot 10^{-6}$ m$^3 = 2 \cdot 10^{11}$ kg $= 2 \cdot 10^8$ tone!

În anii 1910–1911, savantul englez Frederick Soddy (1877–1956) a stabilit că nu toţi atomii elementului chimic dat au mase egale. Ulterior ei au primit denumirea comună de ***izotopi*** (gr. *isos* „egal, la fel" + *topos* „loc").

**Izotopii** sunt atomii aceluiaşi element chimic, au acelaşi număr atomic $Z$, dar nucleele lor au mase diferite, adică numerele de masă $A$ sunt diferite. Proprietăţile chimice ale izotopilor sunt aproximativ aceleaşi, ceea ce demonstrează că şi învelişurile lor electronice sunt la fel. Ca rezultat, toţi izotopii unui element ocupă în tabelul periodic al elementelor chimice acelaşi loc.

Pentru a deosebi izotopii între ei, simbolul chimic X al elementului respectiv este însoţit de doi indici, plasaţi în stânga: jos – numărul atomic $Z$, sus – numărul de masă $A$, adică simbolul izotopului are forma ${}^{A}_{Z}\text{X}$. Din numărul elementelor cu cei mai mulţi izotopi fac parte uraniul, mercurul, stronţiul, staniul, carbonul etc. De exemplu, izotopii carbonului sunt: ${}^{9}_{6}\text{C}$, ${}^{10}_{6}\text{C}$, ${}^{11}_{6}\text{C}$, ${}^{12}_{6}\text{C}$, ${}^{13}_{6}\text{C}$, ${}^{14}_{6}\text{C}$, ${}^{15}_{6}\text{C}$ şi ${}^{16}_{6}\text{C}$. În amestecurile de izotopi existente în natură izotopul ${}^{12}_{6}\text{C}$ constituie 98,9%, izotopul ${}^{13}_{6}\text{C}$ – doar 1,1%, procentul celorlalţi izotopi fiind nesemnificativ.

**În definiţia unităţii atomice de masă se are în vedere izotopul ${}^{12}_{6}\text{C}$.**

Descoperirea izotopilor a demonstrat că nucleele nu mai sunt indivizibile, ele au o anumită structură

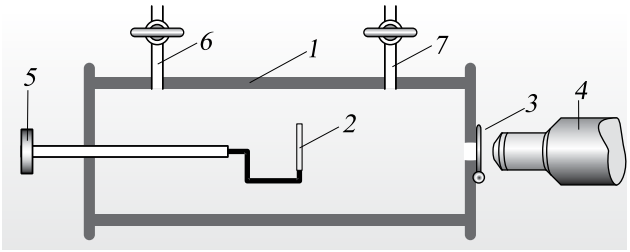



*Fig. 7.1*

interioară. Pentru a o stabili, era necesar să fie identificate particulele ce fac parte din componenţa nucleului. Prima particulă a fost descoperită în anul 1919 de către Rutherford. Schema instalaţiei utilizate este prezentată în *figura 7.1*. În interiorul unui spaţiu ermetic (*1*) se află o sursă (*2*) de particule α. Este necesar de subliniat că **particulele α sunt nuclee ale izotopului de heliu** ${}^{4}_{2}\text{He}$. În calea particulelor α este plasat un ecran transparent (*3*), partea din faţă a lui fiind acoperită cu un strat de substanţă fluorescentă. La incidenţa particulelor α pe acest strat, în locurile respective apar spoturi luminoase, observate prin tubul microscopic (*4*). Mânerul (*5*) permite apropierea sau îndepărtarea sursei (*2*) de ecran (*3*). Prin tuburile (*6*, *7*) dotate cu robinete gazul din spaţiul respectiv poate fi evacuat şi înlocuit cu altul. În timpul experienţei presiunea diferitor gaze era constantă.

Rutherford a constatat că în cazul în care spaţiul conţinea oxigen spoturile luminoase de pe ecranul fluorescent (*3*) dispăreau, dacă distanţa dintre sursă (*2*) şi ecran era mărită până la o anumită valoare minimă. Situaţia rămânea aceeaşi la înlocuirea oxigenului cu dioxidul de carbon. În aceste cazuri, particulele α în mişcarea lor se ciocneau cu moleculele acestor gaze, produceau ionizarea lor, pierdeau multă energie şi nu ajungeau la ecran.

O altă situaţie se observa atunci când spaţiul conţinea aer sau azot. La aceeaşi distanţă dintre sursă şi ecran pe acesta apăreau uneori spoturi luminoase. Apariţia lor poate fi explicată numai prin faptul că particulele α, ciocnind nucleele de azot, eliminau (dezbăteau) din ele o particulă masivă, care lovind stratul fluorescent al ecranului producea spoturi luminoase. Cercetările detaliate ale influenţei câmpurilor electrice şi magnetice asupra mişcării particulelor provenite din atomii de azot au demonstrat că masa lor este egală cu masa celui mai uşor izotop al hidrogenului ${}^{1}_{1}\text{H}$, iar sarcina electrică este pozitivă şi egală cu sarcina elementară. Aceste particule – nucleele izotopului ${}^{1}_{1}\text{H}$ – au fost numite **protoni**.

Experienţa a fost repetată şi cu alte substanţe – bor, fluor, sodiu, aluminiu, neon etc. Rutherford a stabilit că în toate aceste cazuri particulele α dezbat din nucleele respective protoni. Astfel, s-a ajuns la concluzia că **protonii sunt particule ce fac parte din componenţa nucleelor**. Protonii se notează cu litera *p*.

Măsurătorile de mare precizie au stabilit că masa protonului $m_p = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,007276470 u şi sarcina electrică $q_p = +e = +1{,}60217733 \cdot 10^{-19}$ C. Protonul este nucleul cu $Z = 1$ şi $A = 1$. Simbolul său, conform regulii adoptate, este ${}^{1}_{1}p$.

Masa protonului este de 1 836 de ori mai mare decât masa electronului: $m_p = 1\,836\, m_e$. Numărul de masă al electronului este deci egal cu zero, sarcina electrică fiind $-e$. Pentru electron se foloseşte simbolul ${}^{0}_{-1}e$.

În experimentul în care a fost descoperit protonul, Rutherford a realizat **prima reacţie nucleară artificială**. Ţinând cont de faptul că particula α este izotopul ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, reacţia respectivă este:

$$ {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}p. \qquad (7.3) $$

Astfel, Rutherford a realizat transformarea azotului în oxigen.

Conştientizând faptul că prin existenţa numai a protonilor nu poate fi explicată diversitatea izotopilor în natură, Rutherford a admis existenţa încă a unei particule, neutre, ce face parte din componenţa nucleului (a. 1920). Descoperirea acesteia a durat 12 ani.

Primul pas a fost făcut în anul 1930 de către fizicianul german Walter Bothe (1891–1957) împreună cu colaboratorul său H. Becker. Bombardând beriliul cu particule α, ei au înregistrat apariţia unor particule, de natură necunoscută, cu o putere de penetraţie mare. În anul 1932, savanţii francezi, soţii Irène (1897–1956) şi Frederick Jean Joliot-Curie (1900–1958) au orientat radiaţia necunoscută asupra unui strat de parafină. S-a constatat că radiaţia necunoscută dezbate protoni din parafină.

Pasul decisiv a fost făcut în acelaşi an, 1932, de către fizicianul englez James Chadwick (1891–1974). El a stabilit că particulele emise de beriliu, ca rezultat al bombardării cu particule α, sunt particule neutre a căror masă este egală aproximativ cu masa protonului. Acestea au fost denumite **neutroni** şi se notează cu *n*.

În urma unor măsurări de precizie înaltă s-a stabilit că masa neutronului $m_n = 1{,}6749286 \cdot 10^{-27}$ kg = = 1,008664902 u ≈ 1 838 $m_e$. Masa neutronului este cu circa 0,15% mai mare decât masa protonului. Numărul de masă al neutronului este egal cu 1, iar cel de sarcină – cu 0. De aceea neutronul are simbolul ${}^{1}_{0}n$.

De menţionat că neutronul în stare liberă este nestabil şi are durata medie de viaţă de circa 15 min. El este stabil doar în componenţa nucleelor atomice. Astfel,

> au fost identificate **particulele constituente ale nucleului atomic: protonul** ${}^{1}_{1}p$ **şi neutronul** ${}^{1}_{0}n$. Ele poartă un nume comun – **nucleoni**.

După descoperirea neutronului, în anul 1932, fizicianul german Werner Carl Heisenberg (1901–1976) şi cel rus Dmitri Ivanenko (1904–1994), în mod independent, au propus **modelul protono-neutronic al nucleului**. Conform acestuia, nucleul atomului este compus din protoni şi neutroni. Fiecare din ei are numărul de masă egal cu 1, deci numărul total al lor (numărul de nucleoni) este egal cu numărul de masă *A*. Numărul de protoni este egal cu numărul atomic *Z* de sarcini elementare ale nucleului, iar restul de nucleoni $N = A - Z$ sunt neutroni. Prin urmare,

> nucleul elementului chimic ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ este compus din *A* nucleoni, dintre care *Z* sunt protoni şi $N = A - Z$ sunt neutroni.

Modelul protono-neutronic al nucleului permite a explica existenţa izotopilor, care au numere atomice *Z* egale, dar numere de masă *A* diferite. Drept concluzie, nucleele respective conţin numere egale de protoni, însă numere diferite de neutroni.

Astfel, cercetările efectuate de diverşi fizicieni pe parcursul a circa 20 de ani au permis stabilirea modelului nu numai al atomului, ci şi al nucleului său.

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Ce caracteristică fizică a nucleului este determinată de numărul atomic al elementului chimic?
2. Cum se defineşte numărul de masă al nucleului atomic?
3. Ce reprezintă izotopii unui element chimic?
4. Care din numerele ce caracterizează nucleul atomic este acelaşi pentru toţi izotopii unui element chimic? Dar care ia valori diferite?
5. Estimaţi raza aproximativă a nucleului izotopului iodului ${}^{127}_{53}\mathrm{I}$.
6. Câţi protoni şi câţi neutroni conţine nucleul izotopului toriului ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$?

## 7.2.* FORŢELE NUCLEARE. ENERGIA DE LEGĂTURĂ A NUCLEULUI

Protonii din componenţa nucleului atomic sunt încărcaţi cu sarcini electrice pozitive, deci între ei acţionează forţe electrostatice de respingere. Dacă ţinem seama că distanţele dintre protoni sunt foarte mici, conchidem că forţele menţionate sunt mari. Dar protonii nu se împrăştie în spaţiu, ci, împreună cu neutronii, formează o structură compactă şi stabilă – nucleul. Această situaţie poate fi explicată doar dacă se presupune că între nucleoni (protonii şi neutronii din nucleu) acţionează şi forţe de altă natură fizică ce depăşesc forţele de respingere electrică şi menţin împreună nucleonii.

**Forţele care menţin nucleonii împreună în componenţa nucleului sunt numite *forţe nucleare*.**

Cercetările detaliate au scos în evidenţă proprietăţile forţelor nucleare, cele principale fiind:

**1. Forţele nucleare sunt forţe de atracţie.** Astfel ele sunt similare forţelor de atracţie gravitaţională, dar diferă de forţele electrostatice, care pot fi atât de atracţie, cât şi de respingere, în funcţie de semnele sarcinilor electrice care interacţionează.

**2. Forţele de atracţie nucleară nu depind de sarcinile electrice ale nucleonilor.** Atracţia nucleară proton–proton, proton–neutron sau neutron–neutron este identică pentru aceleaşi poziţii reciproce ale perechilor de nucleoni.

**3. Forţele nucleare au rază de acţiune mică.** La distanţe dintre nucleoni mai mari de circa $1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m ele pot fi neglijate.

**4. Forţele nucleare au caracter de saturaţie.** Din cauza razei mici de acţiune fiecare nucleon interacţionează doar cu nucleonii din vecinătate, atrăgând şi fiind atras numai de către aceştia.

**5. Forţele nucleare sunt cele mai puternice forţe cunoscute în natură.** Ele sunt aproximativ de 100 de ori mai intense decât forţele de interacţiune electrică.

Interacţiunea dintre nucleoni s-a dovedit a fi atât de complexă, încât până în prezent n-a fost elaborată o teorie completă a forţelor nucleare.

Din mecanica clasică se cunoaşte:

masa este o mărime fizică aditivă – masa sistemului de corpuri este egală cu suma maselor corpurilor ce fac parte din acest sistem.

Măsurările cu un grad înalt de precizie au demonstrat că în fizica nucleului proprietatea de aditivitate nu se manifestă.

Masa nucleului este mai mică decât suma maselor nucleonilor din care el este constituit.

Nucleul elementului ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ conţine $Z$ protoni şi $N = A - Z$ neutroni. Dacă $m_p$ este masa protonului şi $m_n$ – a neutronului, atunci suma maselor lor este $Zm_p + (A - Z)\, m_n$. Masa nucleului $m_{nucl}$ este mai mică decât suma obţinută:

$$m_{nucl} < Zm_p + (A - Z)\, m_n.$$

**Diferenţa dintre suma maselor protonilor şi ale neutronilor ce formează nucleul şi masa acestuia se numeşte *defect de masă* ($\Delta m$):**

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)\, m_n - m_{nucl}. \qquad (7.4)$$

În experimente se determină nu masele nucleelor, ci masele atomilor. De aceea vom trece expresia pentru defectul de masă (7.4) la masele atomilor, care sunt mai mari decât masele nucleelor cu masele electronilor din jurul lor. Ţinând seama că masa atomului $m_{at} = m_{nucl} + Zm_e$, iar $m_p + m_e = m_{\mathrm{H}}$ este masa atomului de hidrogen, transcriem (7.4) astfel:

$$\Delta m = Zm_{\mathrm{H}} + (A - Z)\, m_n - m_{at}. \qquad (7.5)$$

Defectul de masă se exprimă, de obicei, ca şi masele atomilor, în unităţi atomice de masă (u).

Să calculăm, de exemplu, defectul de masă pentru izotopul de siliciu ${}^{31}_{14}\mathrm{Si}$. Masa acestui atom este egală cu 30,9753 u, a celui de hidrogen – cu 1,00783 u, iar masa neutronului – cu 1,00866 u. Astfel, $\Delta m = 0{,}28154$ u. Defectul de masă pentru acest izotop constituie mai mult de un sfert din unitatea atomică de masă.

Cunoaşterea defectului de masă permite să se determine o caracteristică energetică importantă a nucleului – energia de legătură.

**Se numeşte *energie de legătură a nucleului* mărimea fizică egală cu lucrul minim ce trebuie consumat pentru descompunerea nucleului în protoni şi neutroni separaţi.**

Lucrul se efectuează pentru învingerea forţelor nucleare care menţin protonii şi neutronii împreună în nucleu. Situaţia este analogică celei de descompunere în molecule a unei picături de apă adusă la temperatura de fierbere. Picăturii (în acest scop) i se transmite o cantitate de energie egală cu

căldura de vaporizare. În ambele cazuri, la desfacerea nucleului sau a picăturii, energia sistemului de particule se mărește.

Pentru a calcula creșterea energiei la descompunerea nucleului, pornim de la faptul că acest proces este însoțit de mărirea masei sistemului de particule cu valoarea defectului de masă $\Delta m$. Masei $\Delta m$ îi corespunde, conform relației universale (4.25), energia $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$, unde $c$ este viteza luminii în vid. În cazul dat aceasta este energia de legătură a nucleului $E_{leg} = \Delta E$, adică:

$$E_{leg} = \Delta m \cdot c^2, \qquad (7.6)$$

unde $\Delta m$ este defectul de masă.

Substituind expresia (7.5) în (7.6), obținem formula de calcul a energiei de legătură a nucleului:

$$E_{leg} = (Zm_{\text{H}} + (A - Z)\, m_n - m_{at})\, c^2. \qquad (7.7)$$

La formarea nucleului din protoni și neutroni separați, masa sistemului de particule se micșorează cu $\Delta m$, iar energia $E_{leg}$ este degajată.

Defectul de masă se exprimă în unități atomice de masă (u). Dacă se iau valorile cât mai exacte ale unității atomice de masă, ale vitezei luminii în vid și ale electron-voltului exprimat în Joule, atunci energia echivalentă acestei unități este:

$$1\ \text{u} \cdot c^2 \approx 9{,}315 \cdot 10^8\ \text{eV} = 931{,}5\ \text{MeV}.$$

Pentru energia de legătură a izotopului de siliciu $^{31}_{14}\text{Si}$, al cărui defect de masă a fost calculat mai sus, avem: $E_{leg} = 0{,}28154 \cdot 931{,}5\ \text{MeV} \approx 262{,}2\ \text{MeV}$.

Aceasta este o valoare destul de mare, mult mai mare decât energiile ce figurează în lumea atomilor. Pentru energia de ionizare a hidrogenului (vezi *tema 6.3, b*) am avut valoarea $E_{ion} = 13{,}5$ eV, de circa 20 mil. de ori mai mică decât energia de legătură a nucleului de siliciu.

Energia de legătură $E_{leg}$ este mai mare la nucleele cu un număr de masă $A$ mai mare. Pentru a caracteriza stabilitatea nucleelor, se introduce mărimea fizică, numită **energie de legătură pe nucleon**:

$$\varepsilon = \frac{E_{leg}}{A}, \qquad (7.8)$$

al cărei grafic în funcție de numărul de masă $A$, este prezentat în *figura 7.2*.

Nucleele sunt mai stabile dacă energia de legătură pe nucleon este mai mare. Cele mai stabile, după cum rezultă din grafic, sunt nucleele elementelor din partea centrală a tabelului periodic.

Ulterior acest grafic va fi utilizat pentru a indica modalitățile de obținere a energiei nucleare.

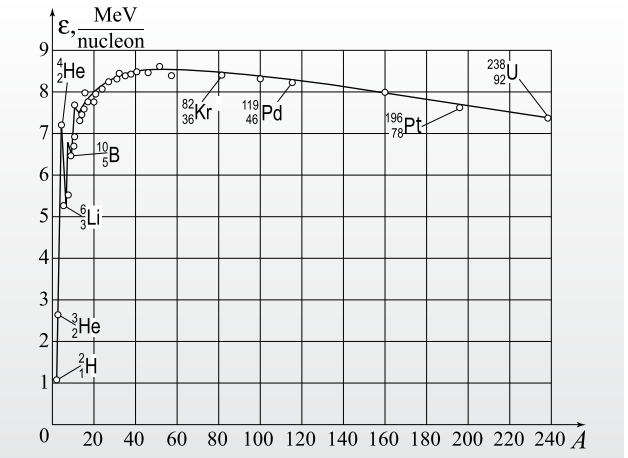



*Fig. 7.2*

## Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se explică faptul că, respingându-se electric între ei, protonii se menţin împreună în componenţa nucleului atomic?
2. Depind forţele nucleare de sarcinile electrice ale nucleonilor?
3. În ce constă caracterul de saturaţie al forţelor nucleare?
4. Ce lege a mecanicii clasice nu se respectă la formarea nucleului atomic din nucleoni?
5. Ce este defectul de masă al nucleului?
6. Cum se definește energia de legătură a nucleului?
7. Calculaţi defectul de masă al izotopului de azot $^{14}_{7}\text{N}$, știind că masa lui este egală cu 14,00307 u.
8. Determinaţi energia minimă necesară pentru a diviza nucleul $^{7}_{4}\text{Be}$ în nucleoni separaţi. Masa atomului acestui izotop este egală cu 7,01693 u.
9. Determinaţi defectul de masă al izotopului $^{62}_{28}\text{Ni}$, dacă energia de legătură pe nucleon pentru el este egală cu 8,795 MeV/nucleon.
10. În baza graficului energiei de legătură pe nucleon, în funcţie de numărul de masă $A$ (*fig. 7.2*), estimaţi:
    a) care din nucleele izotopilor $^{82}_{36}\text{Kr}$, $^{196}_{78}\text{Pt}$ și $^{238}_{92}\text{U}$ este mai puţin stabil;
    b) energia de legătură a nucleului izotopului $^{119}_{46}\text{Pd}$;
    c) defectul de masă al izotopului $^{238}_{92}\text{U}$;
    d) masa atomului izotopului $^{196}_{78}\text{Pt}$.

# 7.3. RADIOACTIVITATEA

## a. Descoperirea radioactivităţii. Transformări radioactive

În anul 1896, fizicianul francez Henri Antoine Becquerel (1852–1908) a observat că sărurile de **uraniu** (U) acţionează (înnegresc) spontan placa fotografică învelită în hârtie neagră. Becquerel a stabilit că această acţiune nu este influenţată de factori externi ca temperatura, presiunea, precum şi de compoziţia chimică a substanţei, din componenţa căreia face parte uraniul. Astfel, a fost descoperită o radiaţie nouă cu proprietăţi deosebite. Substanţele care o emit au fost numite **radioactive**.

În anii următori au fost obţinute noi rezultate. În anul 1898, soţii Maria Sklodowska-Curie (1867–1934) şi Pierre Curie (1859–1906), îndrumaţi de către Becquerel, au stabilit că ***toriul*** (Th) este, de asemenea, radioactiv şi au descoperit două elemente radioactive noi: ***poloniul*** (Po) şi ***radiul*** (Ra), a căror radiaţie este mult mai intensă decât cea a uraniului.

În anul 1899, Rutherford a realizat un experiment a cărui schemă este prezentată în *figura 7.3*. În canalul din interiorul unui bloc de plumb (*1*) a fost introdusă o substanţă radioactivă (*2*). Din canal ieşea un fascicul de radiaţie (*3*), ce cădea pe o placă fotografică (*4*). La developare, în centrul ei s-a observat o pată neagră. Tabloul se modifica dacă radiaţia trecea printre polii unui magnet (*5*). La developarea peliculei, pe ea se observa o pată (*6*) mai apropiată de centrul plăcii, corespunzând unor particule încărcate cu sarcină pozitivă şi o fâşie (*7*) condiţionată de particule cu sarcină electrică negativă. Fluxul de particule pozitive a fost numit **raze** α, al doilea flux – **raze** β. Astfel, Rutherford a stabilit existenţa a două componente ale radiaţiei emise de substanţele radioactive. În acelaşi an Rutherford a descoperit încă un element radioactiv – ***radonul*** (Rn).

În anul 1900, fizicianul francez Paul Villard (1860–1934) a descoperit a treia componentă a radiaţiei, care nu se abătea în câmpul magnetic, numită **raze γ**.

Cercetările au permis să fie stabilită natura razelor α, β şi γ. Mai întâi Becquerel a demonstrat (a. 1900) că razele β reprezintă un fascicul de electroni ce posedă viteze foarte mari, care se apropie de viteza luminii în vid. În 1903, Rutherford a stabilit că particulele α sunt ioni de heliu $He^{2+}$ (în acei ani nucleul

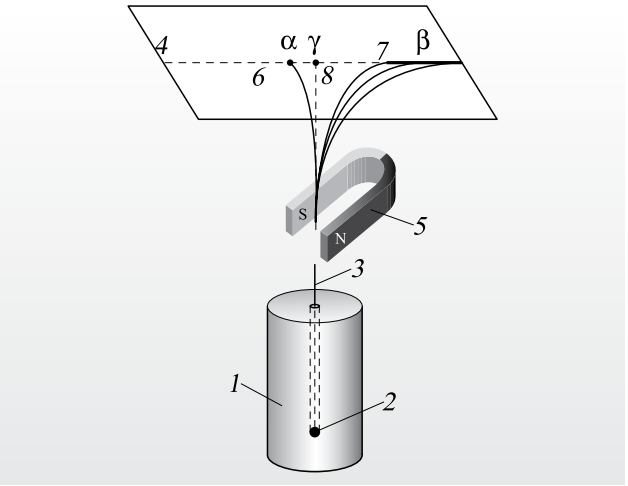



*Fig. 7.3*

încă nu era descoperit), în termeni contemporani – nuclee ale izotopului de heliu $^4_2He$. În fine, s-a constatat că razele γ sunt unde electromagnetice de frecvenţă foarte înaltă, mai mare decât a razelor Röntgen.

În anul 1903, Rutherford şi Soddy au demonstrat experimental că radioactivitatea este însoţită de transformarea unor elemente chimice în altele. De exemplu, a radiului (Ra) în radon (Rn), care este un gaz inert. Astfel, a fost stabilită esenţa fenomenului radioactivităţii.

> ***Radioactivitatea*** **este transformarea spontană a nucleelor unor elemente chimice în nuclee ale altor elemente cu emisia simultană a unor particule.**

Radioactivitatea însoţită de emisia particulelor α mai este numită **dezintegrare α**, iar cea de emisie a particulelor β – **dezintegrare β**.

Să scriem regulile care reflectă transformările radioactive corespunzătoare. Se ţine seama de respectarea legilor conservării sarcinii electrice şi a masei. În cazul dezintegrării α, particula emisă de nucleul iniţial $^A_ZX$ este un nucleu de heliu $^4_2He$. Prin urmare, nucleul Y obţinut are numărul atomic egal cu $(Z - 2)$ şi cel de masă egal cu $(A - 4)$. Regula respectivă este:

$$^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He. \qquad (7.9)$$

> ***La dezintegrarea*** $\alpha$ **elementul radioactiv se transformă într-un element situat cu două căsuţe mai la stânga, adică spre începutul sistemului periodic al elementelor.**

Particula emisă la dezintegrarea β este electronul $^0_{-1}e$, iar regula transformării este:

$$^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e. \qquad (7.10)$$

***Prin dezintegrare* β elementul radioactiv se transformă în elementul situat în căsuţa vecină din dreapta, adică se deplasează cu o căsuţă spre sfârşitul sistemului periodic.**

Aceste două reguli, numite **reguli de deplasare**, au fost stabilite în anul 1913, în mod independent, de către chimiştii fizicieni Frederick Soddy (1877–1956) şi Kasimir Fajans (1887–1975).

În cazul dezintegrării α particulele componente – protonii şi neutronii – fac parte din structura nucleului. În cazul dezintegrării β, electronii emişi nu intră în structura nucleului. Analizând regula de transformare (7.10), constatăm că numărul de masă $A$ este acelaşi la ambele nuclee – primar şi secundar. Prin urmare, ambele nuclee conţin acelaşi număr de nucleoni, dar în nucleul secundar numărul de protoni este cu unul mai mare decât în nucleul primar, în timp ce numărul de neutroni a devenit mai mic cu unu. Conchidem că în interiorul nucleului un neutron s-a transformat în proton şi electron, ultimul fiind expulzat din nucleu:

$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e. \qquad (7.11) $$

Astfel se explică expulzarea electronului din nucleul care nu are electroni în componenţa sa. Situaţia este analogică emisiei fotonilor de către atomii care însă nu-i conţin. În ambele situaţii emisia particulelor are loc în urma unor transformări ce se produc în sistemele fizice considerate.

În anul 1934, soţii Irène şi Frederick Joliot-Curie au descoperit **radioactivitatea artificială**. Bombardând o folie de aluminiu cu particule α, au stabilit că după îndepărtarea sursei, folia pe parcursul unui anumit interval de timp era radioactivă. S-a constatat că în urma bombardării izotopul stabil de aluminiu ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$ s-a transformat în izotopul fosforului ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$ şi un neutron:

$$ {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n. \qquad (7.12) $$

Acest izotop al fosforului, obţinut pe cale artificială, nu este stabil. Fiind radioactiv, el se transformă în izotopul de siliciu ${}^{30}_{14}\mathrm{Si}$ cu emisia unui **pozitron**. Pozitronul este o **antiparticulă** ce are masa egală cu masa electronului şi sarcina electrică $+e$.

Ulterior s-a constatat că în urma bombardării nucleelor stabile cu particule α, protoni, neutroni şi alte particule accelerate, se obţin artificial izotopi ai tuturor elementelor chimice. Pe cale artificială au fost obţinute şi **elementele transuraniene**, cu numărul atomic $Z > 92$.

În prezent sunt cunoscuţi aproximativ 280 de izotopi stabili ai elementelor chimice şi circa 2000 de izotopi nestabili (radioactivi), ultimii, circa 85%, fiind obţinuţi în mod artificial. Izotopii stabili au numărul atomic $Z \leq 83$, iar toţi izotopii cu numere atomice mai mari sunt nestabili. Izotopi nestabili are fiecare element chimic. De exemplu, izotopul hidrogenului, tritiul, ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, este radioactiv.

Particulele α emise de un izotop radioactiv posedă anumite energii cinetice. De exemplu, în urma dezintegrării radiului:

$$ {}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

particulele α emise posedă energii din şirul de valori: 4,8 MeV, 4,6 MeV şi 4,3 MeV. Aceasta demonstrează că energia nucleului de radon obţinut poate lua anumite valori discrete. Energia este minimă în cazul în care energia particulei α emise este maximă, egală cu 4,8 MeV. În acest caz nucleul radonului se află în stare fundamentală. Însă la emisia unei particule cu energie mai mică, de exemplu 4,6 MeV, nucleul radonului rămâne în stare excitată, având energia mai mare decât în stare fundamentală cu diferenţa de 0,2 MeV. Tranziţia de la starea excitată la cea fundamentală este însoţită de emisia unei cuante γ cu energia respectivă de 0,2 MeV. Astfel,

razele γ se emit la tranziţiile nucleelor din stări excitate în cea fundamentală atât în cazul dezintegrărilor α, cât şi în cel al dezintegrărilor β.

Spre deosebire de particulele α, electronii emişi de izotopii radioactivi nu au energii bine determinate. Energiile lor au valori într-un interval continuu, de la zero până la o energie maximă, caracteristică pentru izotopul dat. Aceasta se observă în experimentul reprezentat schematic în *figura 7.3*. Particulele β înnegresc pe placa fotografică o fâşie, ceea ce demonstrează că ele au viteze diferite. Faptul respectiv a creat o situaţie confuză în teoria dezintegrării β. Doar nucleele – cel primar şi cel secundar – au energii bine determinate, iar diferenţa lor trebuie să fie egală cu o valoare anumită a energiei particulei β. Nu era clar cum poate fi respectată legea conservării energiei în cazul în care energia particulei β are valori într-un interval de energii.

În baza legii conservării energiei, în anul 1930, fizicianul austriac Wolfgang Pauli (1900–1958) a presupus că nucleul radioactiv emite simultan particula β şi o particulă neutră cu masă neglijabilă, numită **neutrin**. El preia o parte din energia degajată la dezintegrare.

## b.* Legea dezintegrării radioactive

În urma dezintegrării numărul de nuclee radioactive se micşorează. În anul 1903, fizicienii

E. Rutherford și F. Soddy au formulat **legea dezintegrării radioactive** care exprimă acest număr în funcție de timp ținând cont de faptul că fenomenul studiat este aleatoriu. Este imposibil de prezis care anume nucleu și când se va dezintegra. Se poate prezice doar numărul de nuclee care se vor dezintegra într-un anumit interval de timp. Acest număr este cu atât mai exact, cu cât este mai mare numărul de nuclee radioactive. Despre legea menționată se spune că are un **caracter statistic**.

Notăm cu $N_0$ numărul de nuclee radioactive la momentul $t_0 = 0$ și determinăm numărul $N$ de nuclee radioactive la momentul arbitrar de timp $t$. Fie $dN$ variația numărului de nuclee în intervalul de timp $dt$. În urma dezintegrării, numărul de nuclee rămase radioactive se micșorează, deci variația $dN$ este negativă, $dN < 0$. Numărul de nuclee care au dezintegrat în acest interval de timp $dt$, egal cu $|dN|$, este cu atât mai mare, cu cât intervalul este mai mare, adică $|dN| \sim dt$. Pe lângă aceasta, numărul de nuclee dezintegrate în intervale de timp egale este mai mare dacă numărul de nuclee $N$ pasibile dezintegrării este mai mare: $|dN| \sim N$. În concluzie avem $|dN| \sim Ndt$. Trecând la egalitate și introducând un coeficient de proporționalitate $\lambda$, numit **constantă radioactivă** sau **constantă de dezintegrare**, avem:

$$|dN| = \lambda N dt. \tag{7.13}$$

Din această relație stabilim sensul fizic al constantei radioactive:

$$\lambda = \frac{|dN|}{N \cdot dt}. \tag{7.14}$$

Raportul dintre numărul $|dN|$ de nuclee care au dezintegrat în intervalul $dt$ și numărul de nuclee radioactive $N$ la începutul acestui interval este partea de nuclee care au dezintegrat. Prin urmare,

> constanta radioactivă $\lambda$ este egală cu raportul dintre partea de nuclee radioactive care au dezintegrat într-un interval de timp și mărimea acestui interval.

Variația numărului de nuclee radioactive $dN = -|dN|$, deci $dN = -\lambda N dt$.

Separăm variabilele și integrăm în limitele de la 0 până la $t$ pentru timp și valorile respective $N_0$ și $N$ ale numărului de nuclee. Ca rezultat, pentru numărul de nuclee radioactive $N$ la momentul de timp $t$ obținem:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \tag{7.15}$$

**Numărul de nuclee radioactive se micșorează exponențial cu timpul.**

Pentru a caracteriza radioactivitatea izotopilor, se folosește, mai frecvent, o altă constantă – **timpul (perioada) de înjumătățire $T_{1/2}$, egal(ă) cu intervalul de timp în care numărul de nuclee radioactive se micșorează de două ori**.

Conform acestei definiții, la momentul de timp $t = T_{1/2}$ numărul de nuclee radioactive $N = N_0 / 2$. Substituind aceste valori în legea (7.15) și efectuând transformările respective, pentru constanta radioactivă $\lambda$ obținem:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \tag{7.16}$$

Substituind (7.16) în (7.15) și luând în considerare că $e^{\ln 2} = 2$, pentru legea dezintegrării radioactive obținem o altă expresie echivalentă:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \tag{7.17}$$

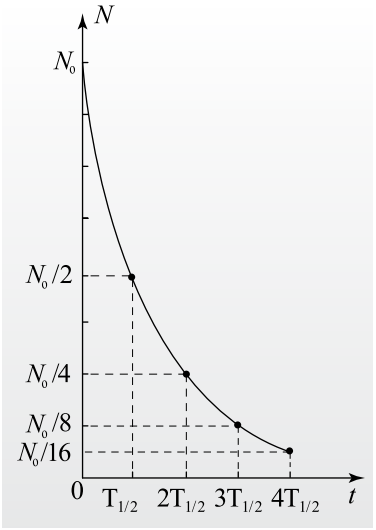



*Fig. 7.4*

*Tabelul 1*

| Izotopul radioactiv | Modul de dezintegrare | Timpul de înjumătățire |
|---|---|---|
| $^{238}_{92}U$ | $\alpha$ | $4{,}5 \cdot 10^9$ ani |
| $^{40}_{19}K$ | $\beta^-$ | $1{,}3 \cdot 10^9$ ani |
| $^{235}_{92}U$ | $\alpha$ | $7 \cdot 10^8$ ani |
| $^{234}_{92}U$ | $\alpha$ | $2{,}5 \cdot 10^5$ ani |
| $^{3}_{1}H$ | $\beta^-$ | 12,3 ani |
| $^{131}_{53}I$ | $\beta^-$ | 8 zile |
| $^{212}_{82}Pb$ | $\beta^-$ | 10,6 ore |
| $^{239}_{92}U$ | $\beta^-$ | 23 min. |
| $^{215}_{84}Po$ | $\alpha$ | $1{,}8 \cdot 10^{-6}$ s |

Graficul ce ilustrează numărul de nuclee radioactive în funcţie de timp este prezentat în *figura 7.4* (p. 109). În *tabelul 1* (p. 109) sunt indicate valorile timpilor de înjumătăţire pentru câţiva izotopi. Din tabel observăm că timpii de înjumătăţire au valori într-un interval foarte mare: de la milionimi de secundă până la miliarde de ani. Diferiţi izotopi ai aceluiaşi element dezintegrează diferit, α sau β, au şi timpi diverşi de înjumătăţire (vezi izotopii uraniului).

Majoritatea izotopilor obţinuţi în urma dezintegrărilor sunt, de asemenea, radioactivi. Ei dezintegrează şi acest proces continuă până se obţine un izotop stabil. **Totalitatea izotopilor care dezintegrează până la izotopul stabil este numită *serie* sau *familie radioactivă*.** În natură se cunosc trei serii de acest fel. Ele încep cu izotopii uraniului $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{235}_{92}\mathrm{U}$ şi cel al toriului $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ şi se termină cu diferiţi izotopi stabili ai plumbului.

## Probleme rezolvate

❶ Determinaţi numărul dezintegrărilor α şi cel al dezintegrărilor $\beta^-$ ce s-au produs la transformarea izotopului de uraniu $^{238}_{92}\mathrm{U}$ în izotopul de radon $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$.

**Se dă:**
$Z_1 = 92$,
$A_1 = 238$,
$Z_2 = 86$,
$A_2 = 222$
$n_\alpha, n_\beta - ?$

**Rezolvare:**

Numărul de masă variază doar la dezintegrările α, la fiecare din ele acesta micşorându-se cu 4. Deci numărul acestor dezintegrări $n_\alpha = (A_1 - A_2)/4$. Avem $n_\alpha = 4$. La fiecare dezintegrare α numărul atomic se micşorează cu 2, şi după $n_\alpha$ dezintegrări se reduce cu $2n_\alpha = 8$. În transformarea considerată numărul atomic s-a micşorat numai cu $Z_1 - Z_2 = 6$. Ţinând seama de faptul că la o dezintegrare $\beta^-$ acest număr se măreşte cu 1, concluzionăm că numărul de dezintegrări $\beta^-$ este: $n_\beta = 2n_\alpha - (Z_1 - Z_2)$; $n_\beta = 2$.

În transformarea analizată numărul dezintegrărilor: $n_\alpha = 4$ şi $n_\beta = 2$.

❷ Organismele vii absorb din atmosferă şi, ca rezultat, conţin o cantitate anumită de carbon radioactiv $^{14}_{6}\mathrm{C}$ cu timpul de înjumătăţire egal cu 5 700 de ani. În urma analizei unor obiecte de lemn descoperite de către arheologi s-a constatat că ele conţin doar 25% din cantitatea de carbon conţinută în prezent în lemnele proaspăt tăiate (la aceeaşi masă de lemn uscat). Cu câţi ani în urmă au fost confecţionate obiectele descoperite de arheologi?

**Rezolvare:**

După tăierea copacilor, lemnul lor nu mai absoarbe carbon radioactiv, acesta se dezintegrează, conţinutul lui în lemn micşorându-se. În fiecare timp de înjumătăţire el se reduce de două ori. În cazul obiectului descoperit de arheologi conţinutul carbonului radioactiv a scăzut de 4 ori, adică de 2 câte 2 ori. Pentru aceasta erau necesari 2 timpi de înjumătăţire. Prin urmare, obiectele descoperite de arheologi au fost confecţionate cu $2 \cdot 5\,700$ de ani = 11 400 de ani în urmă.

Această metodă, ce are la bază determinarea conţinutului de carbon radioactiv în resturile organice, este folosită la determinarea vechimii lor, în special în arheologie. Premiul Nobel pentru chimie (a. 1960) l-a obţinut chimistul american William Franck Libby (1908–1980), care a propus această metodă.

## Verificaţi-vă cunoştinţele

1. În ce constă fenomenul de radioactivitate naturală?
2. Cum variază numărul atomic şi cel de masă la dezintegrarea α?
3. Care este numărul atomic şi cel de masă al nucleului obţinut în urma dezintegrării α a izotopului radioactiv de cupru $^{66}_{29}\mathrm{Cu}$?
4. Este posibil ca în urma dezintegrărilor α şi $\beta^-$ ale unui izotop radioactiv să se obţină un alt izotop al aceluiaşi element? În cazul răspunsului afirmativ, explicaţi prin ce se vor deosebi aceşti izotopi.
5. Determinaţi numărul atomic *Z* şi cel de masă *A* al izotopului care se obţine din izotopul de toriu $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ după 2 dezintegrări $\beta^-$ şi 4 dezintegrări α.
6. Cum se explică expulzarea electronilor de către nuclee la dezintegrarea $\beta^-$ dacă în nuclee nu există electroni?
7. Cum este spectrul de valori ale energiei particulelor α?
8. Cum veţi explica spectrul continuu al valorilor energiei particulelor β?
9. În ce constă sensul fizic al constantei radioactive?
10. După ce lege variază în timp numărul de nuclee radioactive?
11. Cum se defineşte perioada (timpul) de înjumătăţire?
12. Cantitatea de iod radioactiv $^{131}_{53}\mathrm{I}$ s-a micşorat de 16 ori în 32 de zile. Care este perioada de înjumătăţire a acestui izotop al iodului?
13. Ce procent din numărul iniţial de nuclee radioactive dezintegrează într-un interval de timp egal cu 3 timpi de înjumătăţire pentru acest izotop?
14. A câta parte din numărul de atomi ai izotopului $^{3}_{1}\mathrm{H}$ mai rămân radioactivi după 37 de ani? Perioada de înjumătăţire pentru acest izotop este egală cu 12,3 ani.

# 7.4.* REACŢIILE NUCLEARE

## a. Reacţiile nucleare. Caracteristici generale

***Reacţiile nucleare*** **reprezintă transformările unor nuclee în altele ca rezultat al interacţiunii cu diferite particule sau nuclee.**

Notăm cu X nucleul primar, numit şi nucleu-ţintă, care este ciocnit de particula-proiectil *a*. Produse ale interacţiunii respective sunt nucleul rezidual Y şi particula (sau particulele) *b* rezultată(e) din reacţie. Ecuaţia reacţiei se prezintă, de obicei, sub forma:

$$X + a \rightarrow Y + b. \qquad (7.18)$$

Reacţia se produce dacă particula-proiectil pătrunde în regiunea în care acţionează forţele nucleare ale nucleului-ţintă, adică se apropie de acesta la distanţe de circa $10^{-15}$ m. Particulele-proiectil, încărcate cu sarcină electrică pozitivă, trebuie să posede energii cinetice suficiente pentru a învinge forţele de respingere electrică din partea sarcinii pozitive a nucleului şi a se apropia la distanţa menţionată. Asupra particulelor-proiectil neutre nu acţionează forţe electrice de respingere, de aceea ele pot pătrunde în nucleu chiar având viteze mici.

Prima reacţie nucleară (7.3) în condiţii de laborator a fost realizată, după cum s-a relevat mai sus (*tema 7.1*), de către Rutherford în anul 1919. O altă reacţie nucleară a condus la descoperirea neutronului (a. 1932) de către fizicianul englez James Chadwick (1891–1974):

$${}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n.$$

În anul 1934, soţii Irène şi Frederick Joliot-Curie au realizat reacţia (7.12) care a avut ca rezultat descoperirea radioactivităţii artificiale.

În aceste trei reacţii, particulele-proiectil sunt particule α emise de surse radioactive. În prezent se realizează reacţii nucleare utilizându-se fascicule de particule accelerate în instalaţii construite special în acest scop.

În reacţiile nucleare se respectă legile de conservare a sarcinii electrice, a numărului de nucleoni, a impulsului, a energiei, precum şi unele legi de conservare specifice microcosmosului. Analizând ecuaţiile reacţiilor nucleare, ne convingem uşor de conservarea sarcinii electrice prin însumarea indicilor de jos ai simbolurilor de ambele părţi ale săgeţii şi de conservarea numărului de nucleoni însumând în mod similar indicii de sus.

Din punct de vedere energetic, reacţiile nucleare sunt caracterizate de **energia de reacţie** care se exprimă prin diferenţa dintre suma maselor particulelor X şi *a* care intră în reacţie (7.18) şi suma maselor particulelor Y şi *b* ce rezultă din reacţie. Pentru energia de reacţie *Q* se obţine o formulă similară expresiei (7.7) pentru energia de legătură a nucleului:

$$Q = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2. \qquad (7.19)$$

Dacă energia de reacţie este pozitivă, $Q > 0$, reacţia decurge cu degajare de energie, fiind numită **exoenergetică**, iar dacă $Q < 0$, reacţia necesită absorbţie de energie şi este numită **endoenergetică**. Situaţia este similară cu cea din cazul reacţiilor chimice.

Să analizăm un caz concret de reacţie nucleară:

$${}^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}n.$$

Masele izotopilor sunt $m_{{}^{10}_{5}\mathrm{B}} = 10{,}01294\,\mathrm{u}$, $m_{{}^{4}_{2}\mathrm{He}} = 4{,}00260\,\mathrm{u}$, $m_{{}^{13}_{7}\mathrm{N}} = 13{,}00574\,\mathrm{u}$ şi masa neutronului $m_{{}^{1}_{0}n} = 1{,}00866\,\mathrm{u}$. Substituind în (7.19) şi calculând, obţinem $Q = 0{,}00114\,\mathrm{u}\cdot c^2 = 1{,}062$ MeV, unde s-a ţinut seamă că $1\,\mathrm{u}\cdot c^2 = 931{,}5$ MeV. Constatăm că energia de reacţie nucleară este de milioane de ori mai mare decât cele degajate în reacţiile chimice care sunt de ordinul a câţiva electron-volţi (eV). Observăm că $Q > 0$, adică reacţia este exoenergetică.

## b. Fisiunea nucleelor de uraniu

La finele anului 1938, savanţii germani Otto Hahn (1879–1968) şi Fritz Strassman (1902–1980) au descoperit că în urma bombardării cu un fascicul de neutroni lenţi a eşantionului izotopului de uraniu ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ în acesta apar nuclee de bariu, element ce se află în partea de mijloc a sistemului periodic.

Interpretarea corectă a acestor rezultate a fost propusă la începutul anului 1939 de către fiziciana austriacă Lise Meitner (1878–1968) şi fizicianul englez Otto Robert Frish (1904–1979). Ei au presupus că **neutronii provoacă fisiunea nucleelor de uraniu** – divizarea lor în câte două fragmente ce prezintă nuclee ale unor elemente mai uşoare.

În acelaşi an, F. Joliot-Curie şi colaboratorii săi L. Kowarski şi H. von Halban au stabilit că la fisiune se emit 2-3 neutroni.

Prezentăm exemple concrete de reacţii de fisiune. Nucleul primar ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$, absorbind un neutron lent, se transformă în izotopul în stare excitată ${}^{236}_{92}\mathrm{U}^*$ (asteriscul denotă starea excitată a izotopului). Nucleul în această stare este nestabil şi dezintegrează conform

uneia din ecuaţiile de tipul prezentat (aducem doar 3 din mai multe ecuaţii posibile):

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U}^* \rightarrow \begin{cases} {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}n; \\ {}^{144}_{55}\mathrm{Cs} + {}^{90}_{37}\mathrm{Rb} + 2\,{}^{1}_{0}n; \\ {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}n. \end{cases} \quad (7.20)$$

Pentru a ne imagina modul în care se produce fisiunea, vom ţine seama de faptul că raza de acţiune a forţelor nucleare este mică, iar a celor de interacţiune electrică este mare. După absorbirea neutronului lent, nucleul rezultat $^{236}_{92}\mathrm{U}^*$ în stare excitată are un surplus de energie. În urma mişcării nucleonilor, forma nucleului devine alungită. Aria cercului de mijloc, în plan perpendicular pe direcţia în care s-a produs alungirea, este mai mică decât cea din cazul formei sferice. Ca urmare, rezultantele forţelor nucleare care menţin împreună cele două părţi ale nucleului se micşorează. Forţele de respingere electrică dintre protonii acestor părţi le îndepărtează, între ele se formează o „gâtuitură" care continuă să se subţie şi, în fine, se rupe. Nucleul primar s-a divizat în două şi au fost emişi 2-3 neutroni. Nucleele obţinute în urma fisiunii sunt radioactive şi după o serie de dezintegrări se transformă în nuclee stabile.

Estimările arată că energia degajată la fisionarea unui nucleu de uraniu este de circa 210 MeV. Valoarea obţinută este foarte mare, de zeci de milioane de ori mai mare decât cea degajată într-o reacţie chimică (vezi problema rezolvată de la sfârşitul temei).

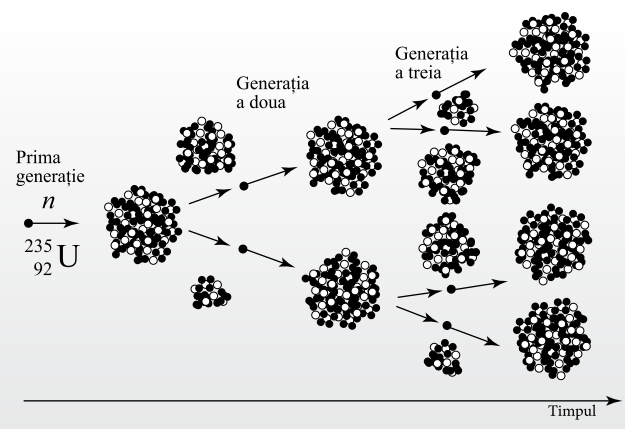



*Fig. 7.5*

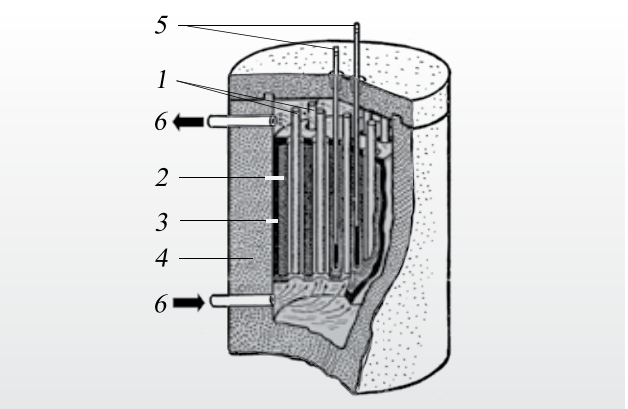



*Fig. 7.6*

## c. Reacţia în lanţ. Reactorul nuclear

Neutronii ce însoţesc fiecare act de fisiune a nucleelor pot produce, la rândul lor, scindarea altor nuclee. Dacă cei 2 neutroni emişi după primul act de fisiune vor produce următoarele 2 acte, se vor obţine deja 4 neutroni. Dacă fiecare din ei va produce câte o fisiune, se vor obţine 8 neutroni etc. Numărul de neutroni creşte de la o generaţie la alta (*fig. 7.5*), producându-se o reacţie în lanţ.

***Reacţie în lanţ*** **este numită reacţia în care neutronii rezultaţi din fisiunea nucleelor stimulează fisiunea altor nuclee.**

**Masa minimă de substanţă la care are loc reacţia în lanţ se numeşte *masă critică*.**

La mase mai mici decât aceasta creşte partea de neutroni care trece pe lângă nuclee şi iese în afara substanţei radioactive fără a provoca fisiunea nucleelor. Evident, izotopul $^{235}_{92}\mathrm{U}$ poate fi păstrat numai în cantităţi mai mici decât masa critică. Aceasta poate fi micşorată folosind învelişuri din substanţe care reflectă neutronii, de exemplu, din beriliu. Astfel, în cazul uraniului aceasta poate fi redusă până la câteva sute de grame.

Reacţia nedirijată de fisiune în lanţ se produce în bomba atomică (denumirea corectă, bombă nucleară), în care două fragmente de uraniu $^{235}_{92}\mathrm{U}$, având fiecare masa mai mică decât cea critică, dar suma maselor lor fiind mai mare decât aceasta, se află în interiorul unui înveliş metalic. La momentul respectiv, fragmentele de uraniu sunt suprapuse. Se obţine un corp cu masa mai mare decât cea critică şi are loc explozia nucleară.

**Reacţia dirijată de fisiune în lanţ** se realizează în reactorul nuclear, a cărui schemă este prezentată în *figura 7.6*. Regiunea în care se produce reacţia în

lanţ este numită **zonă activă**. Uraniul natural conţine doar circa 0,7% de izotop fisionabil $^{235}_{92}U$, restul de 99,3% revenind izotopului $^{238}_{92}U$. Prin separarea izotopilor se obţine uraniu bogat în izotopul fisionabil, numit **uraniu îmbogăţit**. Fisiunea acestui izotop se produce mult mai eficient sub acţiunea neutronilor lenţi cu viteze de circa $2 \cdot 10^3$ m/s. Neutronii emişi în urma fisiunii au viteze mult mai mari, de ordinul $10^7$ m/s. Pentru reducerea vitezelor acestora se foloseşte **moderatorul** (apa, apa grea, grafitul sau un amestec al lor). La mişcarea prin moderator neutronii rapizi pierd din energie, devenind lenţi. Ca rezultat, numărul de nuclee ce fisionează se măreşte considerabil. Aceşti factori determină structura zonei active: ea reprezintă un sistem de blocuri sau bare de uraniu (*1*) plasate în spaţiul cu moderator (*2*).

Zona activă este înconjurată de un **înveliş reflector** (*3*), mai frecvent din beriliu, care reflectă neutronii şi îi întoarce în zona activă, intensificând astfel fisiunea nucleelor. În exteriorul acestuia se află **învelişul protector de radiaţie** (*4*) din beton armat.

Funcţionarea reactorului este dirijată cu ajutorul **barelor de control** (*5*) din compuşi ai cadmiului sau borului care absorb puternic neutronii lenţi. Introduse complet, barele absorb un număr mare de neutroni, astfel încât reacţia în lanţ nu se produce. Pentru a o iniţia, barele sunt scoase parţial până se produce reacţia în regim staţionar. În cazul în care accidental intensitatea reacţiei se măreşte brusc, barele de control sunt introduse automat în zona activă şi reacţia este întreruptă.

Energia degajată în zona activă este preluată de un **agent termic** (*6*), consumată apoi la producerea vaporilor de apă care pun în funcţiune turbinele staţiilor electrice. Reactoarele nucleare pun în funcţiune, de asemenea, spărgătoarele de gheaţă, submarinele etc.

Primul reactor nuclear în lume a fost construit la Chicago (SUA) sub conducerea lui Enrico Fermi (1901–1954), fiind pus în funcţiune la 2 decembrie 1942. În Europa, primul reactor nuclear a fost construit în anul 1946, în URSS, sub conducerea lui Igor Kurciatov (1903–1960). În prezent sunt construite şi funcţionează mai mult de o mie de reactoare, cele mai multe dintre ele fiind componente ale unor centrale nucleare electrice. Acestea produc circa 6% din energia electrică consumată în lume, iar în ţări ca Franţa şi Suedia – mai mult de jumătate din energia consumată.

## d. Fuziunea termonucleară

Cantităţi mari de energie se degajă la sinteza nucleelor situate la începutul sistemului periodic prin **fuziunea (contopirea) nucleelor** mai uşoare.

Să considerăm, de exemplu, fuziunea nucleelor de deuteriu $^{2}_{1}H$ şi tritiu $^{3}_{1}H$:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n. \qquad (7.21)$$

Calculăm energia degajată în această reacţie (la ea participă 5 nucleoni) pornind de la formula (7.19) şi ţinând cont de faptul că $1\ u \cdot c^2 = 931{,}5$ MeV. Masele particulelor participante sunt: $m_{^{2}_{1}H} = 2{,}01355$ u, $m_{^{3}_{1}H} = 3{,}01550$ u, $m_{^{4}_{2}H} = 4{,}00150$ u şi $m_{^{1}_{0}n} = 1{,}00866$ u. Efectuând calculele respective, obţinem pentru energia ce revine la 5 nucleoni valoarea de 17,6 MeV. Astfel, în reacţia de fuziune nucleară (7.21) energia de legătură pe nucleon variază cu 17,6 MeV: 5 nucleoni ≈ ≈3,5 MeV/nucleon. Această energie este degajată.

Comparând această valoare a energiei degajate pe nucleon (3,5 MeV/nucleon) în reacţia de fuziune cu energia degajată pe nucleon în reacţia de fisiune a uraniului 210 MeV: 235 nucleoni (0,9 MeV/nucleon), constatăm că în cazul reacţiei de fuziune se degajă pentru fiecare nucleon energie de circa 4 ori mai mare decât la fisiunea uraniului.

Acest rezultat demonstrează eficienţa reacţiilor de fuziune nucleară ca surse de energie. Trebuie să se ţină seama şi de rezervele enorme de deuteriu în natură în apele mărilor şi oceanelor. Ele satisfac necesităţile populaţiei Terrei în energie pentru câteva sute de milioane de ani. Tritiul nu există în natură, el poate fi obţinut prin reacţie nucleară:

$$^{6}_{3}Li + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{3}_{1}H. \qquad (7.22)$$

Un avantaj mare al utilizării reacţiilor de fuziune nucleară este că în ele nu se obţin deşeuri radioactive.

Realizarea în practică a reacţiilor de fuziune este mult mai dificilă decât a celei de fisiune, deoarece nucleele izotopilor hidrogenului sunt încărcaţi cu sarcini electrice pozitive, deci ele se resping. Reacţia de fuziune se va produce dacă nucleele vor fi apropiate unul de altul la distanţe de ordinul razei forţelor nucleare (circa $10^{-15}$ m). Rezultă că nucleele trebuie să posede energii cinetice suficiente pentru a învinge forţele de respingere electrostatică la apropierea lor. Aceste energii pot fi obţinute prin încălzire până la temperaturi foarte înalte, de circa $10^7$K. Din această cauză reacţiile date sunt numite **reacţii de fuziune termonucleară**.

În natură asemenea temperaturi posedă Soarele și stelele. Reacțiile de fuziune termonucleară produc energia radiației emise de ele. Masele nucleelor rezultate din reacție sunt mai mici decât ale celor care fuzionează. Prin urmare, masa Soarelui se micșorează în fiecare secundă cu circa 4 milioane de tone. Pe Soare se consumă în fiecare secundă circa 100 milioane de tone de hidrogen, rezervele respective fiind suficiente pentru a-i susține activitatea timp de 100 miliarde de ani.

Prioritatea reacțiilor de fuziune termonucleară față de reacțiile de fisiune menționate au plasat problema realizării practice a fuziunii termonucleare dirijate în centrul atenției savanților. Soluționarea ei este foarte dificilă. Pentru ca nucleele izotopilor de hidrogen să poată fuziona, sunt necesare temperaturi foarte înalte. La aceste temperaturi substanța se află în stare ionizată, cunoscută sub numele de **plasmă**.

Problema fiind de o importanță deosebită pentru asigurarea omenirii cu energie, necesită concentrarea eforturilor savanților din diferite țări. În acest scop, la 28 iunie 2005, Uniunea Europeană, SUA, Rusia, China, Japonia și Coreea de Sud au luat decizia de a construi împreună (către anul 2015) un reactor experimental termonuclear internațional la Cadarache (Franța) pentru a cerceta și a realiza fuziunea termonucleară dirijată. În prezent lucrările de construcție a reactorului continuă, iar primele experimente de fuziune termonucleară sunt preconizate pentru anul 2025.

## Problemă rezolvată

Calculați energia degajată în urma fisiunii nucleelor dintr-o cantitate de uraniu cu masa de 1 g. Determinați masa cărbunelui cu puterea calorică de 30 MJ/kg care trebuie arsă pentru a obține aceeași energie.

**Se dă:**

$A = 235$,
$1\ \text{u} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$,
$m = 10^{-3}\ \text{kg}$,
$q = 3 \cdot 10^{7}\ \text{J/kg}$

$E - ?,\ m_c - ?$

**Rezolvare:**

Energia degajată la fisiunea unui nucleu de uraniu $Q = 210$ MeV. Având în vedere că 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J, obținem $Q = 210 \cdot 10^{6} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 3{,}36 \cdot 10^{-11}$ J.

Masa unui nucleu de uraniu $m_0 = A \cdot \text{u} = 235 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 3{,}90 \cdot 10^{-25}\ \text{kg}$.

Numărul nucleelor de uraniu în masa $m$ este $N = \frac{m}{m_0}$. La fisiunea lor s-a degajat energia $E = NQ = \frac{m}{m_0} \cdot Q = 8{,}62 \cdot 10^{10}$ J.

Masa de cărbune ce trebuie arsă pentru a obține aceeași cantitate de energie

$$m_c = \frac{E}{q} \approx 2{,}87 \cdot 10^{3}\ \text{kg} = 2{,}87\ \text{tone}.$$

Comparați: 1 g de uraniu și 2,87 tone de cărbune!

## Verificați-vă cunoștințele

1. Folosind regulile de conservare, stabiliți natura particulei-proiectil *a* din următoarea reacție nucleară:
$$^{24}_{12}\text{Mg} + a \rightarrow {}^{27}_{13}\text{Al} + {}^{1}_{1}p.$$
2. Din ce substanță X se obține aurul în următoarea reacție nucleară:
$$\text{X} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{198}_{79}\text{Au} + {}^{1}_{1}\text{H}?$$
3. Determinați izotopul Y obținut ca rezultat al următoarei reacții:
$${}^{12}_{6}\text{C} + {}^{2}_{1}\text{H} \rightarrow \text{Y} + {}^{1}_{1}\text{H}.$$
4. Stabiliți natura particulei *b* emise în reacția:
$${}^{14}_{7}\text{N} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}\text{C} + b.$$
5. Cum se poate stabili dacă într-o reacție nucleară energia este degajată sau absorbită?
6. Calculați energia degajată în următoarea reacție nucleară:
$${}^{10}_{5}\text{B} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{7}_{3}\text{Li} + {}^{4}_{2}\text{He}.$$
Masele particulelor implicate în reacție sunt:
$m_{^{10}_{5}\text{B}} = 10{,}01294$ u, $m_{^{1}_{0}n} = 1{,}00866$ u, $m_{^{7}_{3}\text{Li}} = 7{,}01601$ u și $m_{^{4}_{2}\text{He}} = 4{,}00260$ u.
7. Care reacție de fisiune este numită reacție în lanț?
8. Ce reprezintă masa critică? Cum veți explica necesitatea introducerii acestei noțiuni?
9. În ce constă necesitatea îmbogățirii uraniului folosit în reactoarele nucleare?
10. Care este rolul moderatorului în reactoarele nucleare?
11. În ce constă reacția de fuziune nucleară? Din ce cauză ea este numită termonucleară?
12. Care sunt avantajele reacțiilor de fuziune termonucleară față de cele de fisiune a uraniului?

## 7.5.* DETECTOARE DE RADIAŢII IONIZANTE

Pe parcursul anilor au fost elaborate şi implementate mai multe metode de cercetare a radiaţiilor nucleare. La baza metodelor respective se află proprietatea particulelor încărcate de a ioniza şi a excita particulele din componenţa substanţei.

Aici vom lua cunoştinţă de ideile fizice ale principalelor metode. Realizarea practică a unora din ele este destul de dificilă, fiindcă instalaţiile respective sunt masive, sofisticate şi costisitoare.

***Metoda emulsiilor fotografice*** i-a permis lui Becquerel să descopere radioactivitatea naturală (a. 1896). Metoda aceasta se bazează pe acţiunea ionizantă a particulelor încărcate. Trecând prin pelicula fotografică, ele ionizează, asemenea luminii, cristalele microscopice de bromură de argint (AgBr). La developare argintul metalic formează mai multe linii punctate negre. Acestea marchează atât traseul particulei incidente, cât şi locurile unde s-au produs reacţii nucleare, precum şi traseele particulelor rezultate. Grosimile liniilor sunt determinate de sarcinile şi masele particulelor, iar lungimile – de energiile lor.

***Contorul cu scintilaţii*** (scânteieri) a fost inventat în anul 1903 de către fizicianul englez William Crookes (1832–1919), după ce a fost descoperită fluorescenţa sulfurii de zinc provocată de ciocnirile particulelor $\alpha$. Cu ajutorul lupei sau microscopului pot fi observate locurile unde s-au produs scintilaţiile. E. Rutherford a utilizat această metodă la cercetarea împrăştierii particulelor $\alpha$ şi a descoperit nucleul.

În prezent scintilaţiile sunt înregistrate prin intermediul elementelor fotoelectrice care transformă semnalele luminoase în impulsuri electrice. După valorile acestor impulsuri se fac concluzii suplimentare privind energiile particulelor incidente.

***Contorul cu descărcare electrică în gaze*** a fost inventat în anul 1908 de către fizicianul german Hans Wilhelm Geiger (1882–1945) în colaborare cu E. Rutherford. În anul 1928, H. Geiger şi W. Müller au perfecţionat contorul, care în prezent este cunoscut sub numele de **contorul Geiger–Müller**.

Reprezentarea schematică a contorului este redată în *figura 7.7.* Un tub cilindric de sticlă conţine un anod (*1*) de forma unui fir subţire, întins de-a lungul tubului, şi un catod (*2*) – o peliculă metalică depusă pe suprafaţa interioară a tubului sau un cilindru

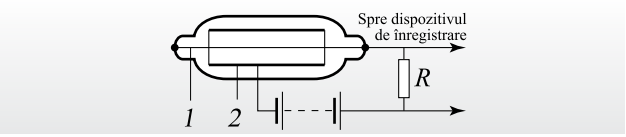



*Fig. 7.7*

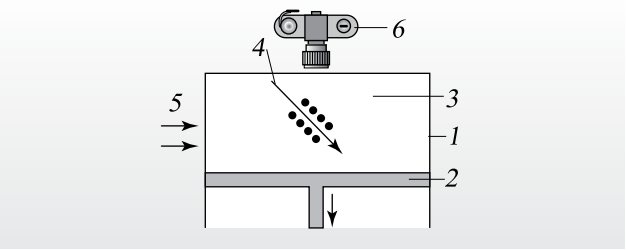



*Fig. 7.8*

metalic coaxial cu anodul. Tubul este umplut cu gaz, de exemplu, un amestec de argon cu vapori de spirt metilic, la o presiune de câteva zecimi din cea atmosferică. Între electrozi este aplicată o tensiune înaltă, dar insuficientă pentru a produce descărcări electrice în tub. Intensitatea câmpului electric în regiunea anodului este mult mai mare decât lângă catod (aproape de anod – liniile de intensitate sunt mult mai dense decât lângă catod).

Particula încărcată, pătrunzând cu viteză mare în interiorul tubului, ionizează gazul. Ionii pozitivi se deplasează spre catod, iar electronii – spre anod, unde intensitatea câmpului electric este mai mare. Obţinând energii mari, ei ionizează prin ciocnire atomii neutri ai gazului. Se formează o avalanşă de electroni şi în tub se produce o descărcare electrică. Ca rezultat, scade mult rezistenţa amestecului din tub şi creşte brusc intensitatea curentului în circuit. Între capetele rezistorului *R* se produce un impuls de tensiune ce este transmis la dispozitivul de înregistrare. După fiecare impuls de tensiune la rezistor descărcarea electrică încetează, contorul revine la starea iniţială şi poate să înregistreze particulele următoare.

Contorul Geiger–Müller se foloseşte pentru numărarea automată a particulelor încărcate şi a fotonilor (cuantelor) $\gamma$. Acesta poate înregistra până la 1 000 de particule pe secundă.

***Camera cu ceaţă*** a fost inventată în anul 1912 de către fizicianul englez Charles Thomas Rees Wilson (1869–1959) şi este cunoscută mai mult sub numele de **camera Wilson**. Ea reprezintă (*fig. 7.8*) un vas din

sticlă (*1*) dotat cu un piston mobil (*2*). Camera conține vapori de apă sau de spirt etilic (*3*) cu densitatea apropiată de cea a vaporilor saturanți.

La deplasarea bruscă a pistonului în jos vaporii se dilată adiabatic, temperatura lor se micșorează. Astfel, ei devin suprasaturanți. Starea dată este nestabilă. Dacă în cameră pătrunde o particulă încărcată și ionizează moleculele, ionii formați devin centre de condensare și în jurul lor se formează picături de lichid. Traseul particulei încărcate este marcat de o urmă vizibilă (*4*) cu lățimea de până la 1 mm. Traseul este iluminat lateral (*5*) și fotografiat (*6*).

Fotografiile obținute cu ajutorul camerei Wilson reprezintă urme luminoase pe un fundal întunecat. După lățimea urmelor, se pot face concluzii referitor la natura particulei încărcate. Urmele lăsate de particulele $\alpha$ sunt mai late decât cele lăsate de electroni. Particulele cu energii mai mari lasă urme mai lungi.

O informație mai amplă se obține prin introducerea camerei Wilson într-un câmp magnetic omogen (v. *Lucrarea de laborator de mai jos*).

***Camera cu bule.*** A fost inventată în anul 1952 de către fizicianul american Donald Arthur Glaser (1926–2013). Ea reprezintă un alt dispozitiv care permite vizualizarea traseului particulei încărcate. Într-un vas se află un gaz lichefiat – hidrogen, deuteriu, xenon, propan etc. – la presiune înaltă. Substanța se află în stare lichidă, chiar dacă temperatura ei este mai mare decât temperatura de fierbere la presiune atmosferică normală. Prin micșorarea bruscă a presiunii (în anumite limite) substanța este adusă în stare de lichid supraîncălzit. Această stare este nestabilă, deoarece în condițiile date în vas ar trebui să se afle lichid și vapori saturanți. Particula încărcată care pătrunde în vas formează un lanț de ioni. Aceștia servesc drept centre de vaporizare și în jurul lor se formează bule mici de vapori ai acestui lichid.

Lanțul acestor bule marchează traseul particulei în lichid și, fiind luminat lateral, poate fi fotografiat.

Pentru a obține o informație mai bogată despre particula studiată, camera cu bule se introduce, ca și cea cu ceață, într-un câmp magnetic.

Despre rolul important ce l-au jucat camerele cu ceață și cu bule în domeniul cercetărilor nucleare denotă faptul că inventatorii lor au devenit laureați ai Premiului Nobel (Wilson – în 1927 și Glaser – în 1960).

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce proprietăți fizice ale radiațiilor nucleare se află la baza metodelor de cercetare a acestora?
2. În ce constă metoda emulsiilor fotografice?
3. În baza cărui fenomen fizic funcționează contorul cu scintilații?
4. Cum funcționează contorul Geiger–Müller?
5. Care mărimi fizice ce caracterizează particulele încărcate pot fi determinate cu ajutorul camerei Wilson?
6. Ce informații suplimentare despre radiațiile nucleare pot fi obținute prin introducerea camerei Wilson și a celei cu bule într-un câmp magnetic?

## Lucrare de laborator

### Studiul urmelor particulelor elementare încărcate

| | |
|---|---|
| *Scopul lucrării:* | Determinarea razei de curbură a traiectoriei particulelor elementare înregistrate în camera Wilson, calculul energiei lor cinetice și a sarcinii specifice. |
| *Aparate și materiale necesare:* | Fotografia traseelor lăsate de particulele încărcate în camera Wilson, riglă milimetrică, hârtie de calc. |

### Considerații teoretice

O particulă încărcată, ce intră într-un câmp magnetic perpendicular pe liniile lui de inducție, se mișcă în acest câmp pe o traiectorie circulară cu raza (1.7):

$$r = \frac{mv}{qB}, \qquad (7.23)$$

unde $m$, $q$ și $v$ sunt, respectiv, masa, sarcina electrică și viteza particulei încărcate, iar $B$ este inducția câmpului magnetic.

La introducerea camerei Wilson într-un câmp magnetic orientat perpendicular pe direcția de mișcare a particulelor, traseele înregistrate vor prezenta niște

porţiuni de cerc. Având fotografia acestor trasee, raza de curbură a traiectoriei se poate măsura direct.

Fie *O* centrul arcului de cerc (*fig. 7.9*). Dacă trasăm coarda *AB* = *l*, atunci triunghiul *AOB* este isoscel, iar *OD* este înălţime şi mediană. Notând înălţimea sectorului de cerc *CD* = *h* din triunghiul dreptunghic *ODB*, avem:

$$r^2 = (r-h)^2 + \frac{l^2}{4},$$

din care rezultă:

$$r = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}. \qquad (7.24)$$

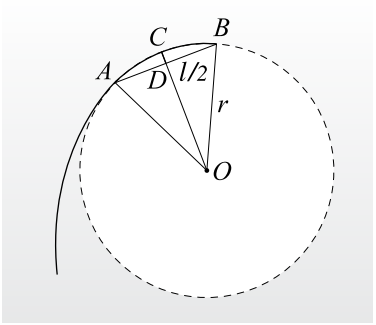


*Fig. 7.9*

Dacă se cunoaşte traseul particulei înregistrate (sarcina şi masa sunt cunoscute), atunci se poate determina şi energia ei cinetică. Folosind relaţia (7.23), avem:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot \frac{(qBr)^2}{m^2} = \frac{(qBr)^2}{2m}. \qquad (7.25)$$

Pentru determinarea sarcinii specifice a unei particule necunoscute, traseul acesteia se înregistrează în aceleaşi condiţii ca şi traseul unei particule cunoscute. În acest caz *v* şi *B* sunt aceleaşi şi pentru sarcina specifică necunoscută din (7.23) obţinem:

$$\left(\frac{q}{m}\right)_x = \frac{r}{r_x} \cdot \left(\frac{q}{m}\right), \qquad (7.26)$$

unde *r* şi $r_x$ sunt razele de curbură ale traiectoriilor particulei cunoscute şi, respectiv, ale celei necunoscute.

În *figura 7.10* este redată fotografia traseelor nucleului de heliu şi ale nucleelor izotopilor de hidrogen înregistrate în camera Wilson, situată într-un câmp magnetic de inducţie *B* = 2,2 T. Este cunoscut că toate particulele intră în acest câmp cu una şi aceeaşi viteză, orientată perpendicular pe liniile de inducţie, şi traiectoria 1 aparţine izotopului de hidrogen ${}_1^1\mathrm{H}$, adică protonului.

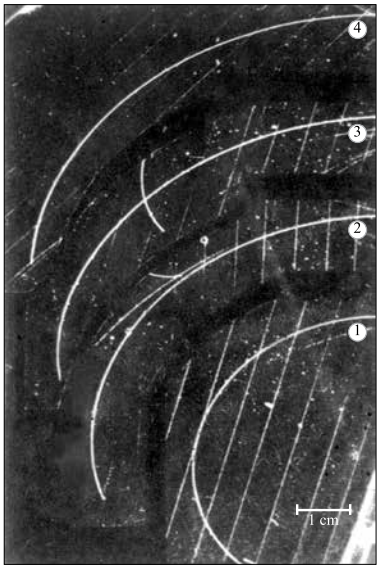


*Fig. 7.10*

**Mod de lucru:**

**1.** Aşezaţi hârtia de calc pe fotografia din *figura 7.10* şi transferaţi pe ea urmele înregistrate în camera Wilson de două particule: a protonului cu numărul 1 şi a doua la indicaţia profesorului.

**2.** Trasaţi câte o coardă la capetele traiectoriei protonului. Măsuraţi lungimile acestor coarde şi înălţimile *h* respective, iar din relaţia (7.24) calculaţi raza de curbură a traiectoriei protonului $r_{1,i}$ la începutul şi $r_{1,f}$ la sfârşitul mişcării lui.

**3.** Folosind relaţia (7.25), calculaţi energia cinetică a protonului în cele două poziţii şi determinaţi cu cât s-a micşorat energia lui în timpul parcurgerii acestei traiectorii.

**4.** Trasaţi o coardă la începutul traiectoriei particulei necunoscute. Măsuraţi lungimea ei *l* şi înălţimea *h* a sectorului de cerc obţinut. Calculaţi raza de curbură $r_x$.

**5.** Folosind relaţia (7.26), determinaţi sarcina specifică $(q/m)_x$ a particulei necunoscute. Stabiliţi ce nucleu reprezintă această particulă.

**6.** Prezentaţi rezultatele obţinute sub forma unui referat.

## 7.6.* EFECTUL BIOLOGIC AL RADIAŢIILOR NUCLEARE

Noi ne aflăm, metaforic exprimându-ne, într-un ocean de radiaţie de natură diferită: particule α, protoni, neutroni, particule β (electroni), radiaţii γ etc.

Cea mai mare parte a surselor de radiaţie sunt naturale: razele cosmice – un flux de particule încărcate, în majoritate protoni, care bombardează Pământul şi care generează alte particule în urma interacţiunilor cu nucleele din atmosferă; izotopii radioactivi din scoarţa Pământului; radonul radioactiv din atmosferă, precum şi izotopii ce se află în produsele alimentare şi în apă. Printre sursele artificiale sunt aparatele folosite în medicină, îndeosebi instalaţiile Röntgen, unele produse industriale, izotopii radioactivi utilizaţi în industrie şi agricultură, industria de dobândire, prelucrare a uraniului şi a deşeurilor radioactive etc.

Radiaţiile nucleare au proprietatea de a excita şi ioniza atomii şi moleculele. Ca rezultat, se dereglează activitatea biochimică a celulelor iradiate, formându-se molecule noi, improprii acestor celule. După încetarea acţiunii radiaţiei, schimbările respective nu dispar, unele consecinţe pot să se manifeste după anumite intervale de timp.

Cele mai vulnerabile la radiaţie în organismele omului şi animalelor sunt măduva oaselor (este dereglat procesul de formare a sângelui), glandele limfatice, splina, tractul digestiv ş.a. În celulele germinale apar efecte care conduc la mutaţii genetice în descendenţe.

Cele menţionate ne determină să avem unele cunoştinţe despre radiaţiile nucleare, mărimile ce le caracterizează, precum şi modalităţile de protejare.

Este evident că efectele radiaţiei nucleare depind nu numai de energia absorbită de corp, ci şi de masa lui.

**Se numeşte *doză de radiaţie absorbită* raportul dintre energia absorbită $E_{abs}$ şi masa $m$ a corpului iradiat:**

$$D = \frac{E_{abs}}{m}. \qquad (7.27)$$

Unitatea dozei de radiaţie absorbită, adoptată la Conferinţa generală pentru măsuri şi greutăţi (1975), este numită **gray** (cu simbolul Gy), anume 1 Gy = 1 J/kg.

***Un gray* (*Gy*) este doza de radiaţie absorbită în cazul în care corpul cu masa de 1 kg absoarbe o energie de 1 J.**

Unitatea respectivă poartă numele fizicianului englez L.H. Gray (1905–1965), care a obţinut succese în utilizarea radiaţiei pentru tratarea maladiilor canceroase.

Este important de menţionat faptul că acţiunea biologică a radiaţiei depinde, de asemenea, de tipul ei. De exemplu, la aceeaşi doză de radiaţie absorbită particulele α produc un efect biologic de 20 de ori mai mare decât razele γ.

**Dozele mari sunt nocive pentru sănătate. De aceea în cazuri de accidente care pot fi însoţite de emisii ale substanţelor radioactive trebuie respectate unele reguli de protejare: să părăsim locul respectiv, să ne îndepărtăm cât mai mult de el; să folosim echipament special de protecţie; în cazul necesităţii efectuării unor lucrări în zona iradiată să reducem timpul aflării în ea.**

Pentru a stabili gradul de iradiere, sunt utilizate aparate speciale – **dozimetrele**. Măsurile de protecţie se iau în funcţie de acest grad.

În prezent se consideră că existenţa fondului natural de radiaţie a influenţat benefic evoluţia vieţii pe Pământ. S-au efectuat experimente speciale cu o serie de plante crescute în încăperi în care radiaţia practic lipsea. S-a constatat că plantele respective erau mai slab dezvoltate şi dădeau o recoltă mai mică decât cele crescute în prezenţa radiaţiei naturale a Pământului. Prin urmare, în lipsa fondului radioactiv natural viaţa pe Pământ nu ar fi fost aşa cum este în prezent.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Care proprietate a radiaţiilor nucleare determină efectul lor biologic?
2. Cum este definită doza de radiaţie absorbită?
3. Care este unitatea de doză de radiaţie absorbită?
4. Cum trebuie de procedat în cazul accidentelor însoţite de emisii de radiaţii?
5. Pregătiţi un referat cu tema: „Accidentele nucleare şi impactul lor asupra naturii şi a vieţii pe Pământ”.

## 7.7.* PARTICULE ELEMENTARE

O problemă de care au fost preocupaţi savanţii tuturor timpurilor este cea despre constituenţii primari ai materiei.

**Partea constitutivă a materiei care nu mai poate fi descompusă în unităţi mai simple se numeşte *particulă elementară*.**

Un timp îndelungat atomul era considerat cel mai mic constituent indivizibil al materiei, adică o particulă elementară. Însă descoperirile electronului de către J.J. Thomson (1897), apoi a protonului de către E. Rutherford (1919) şi a neutronului de către J. Chadwick (1932) au demonstrat că atomul prezintă o structură complicată. Astfel, până în anul 1932 erau cunoscute patru particule elementare – electronul, protonul şi neutronul – ca părţi componente ale atomului şi fotonul – ca purtător al interacţiunii electromagnetice. Se considera că ele reprezintă acei constituenţi primari din care poate fi construită întreaga lume materială. Protonii şi neutronii legaţi în nuclee împreună cu electronii formează atomii. Aceştia, la rândul lor, asociindu-se în molecule, formează substanţa.

Foarte curând însă s-a constatat că există şi alte particule elementare.

### a. Descoperirea particulelor elementare

În anul 1935, fizicianul nipon Hideki Yukawa (1907–1981) a prezis existenţa unei noi particule elementare. Conform teoriei sale, această particulă trebuia să joace rolul de purtător al interacţiunii tari de atracţie dintre nucleoni, asemenea fotonului, purtător al interacţiunii electromagnetice între particulele încărcate. Din estimările lui Yukawa, pentru masa noii particule s-a obţinut o valoare de aproximativ 250 de mase ale electronului, intermediară între masa electronului şi cea a protonului. Din această cauză particula prezisă a căpătat denumirea de **mezon** (din gr. *mesos* „mijlociu, intermediar").

Supoziţia teoretică a existenţei mezonului a impulsionat cercetările experimentale care ulterior au condus la descoperirea de noi particule elementare. În anul 1936, fizicianul american Carl David Anderson (1905–1991) şi studentul său S. Neddermeyer (1907–1988) au descoperit în razele cosmice o particulă cu masa de aproximativ 207 ori mai mare decât masa electronului $m_e$. Această valoare se deosebea de cea prezisă teoretic, însă, după cum s-a constatat, particula numită **mezon** $\mu$ sau **miuon** nu participă la interacţiunea dintre nucleoni, deci nu poate fi mezonul lui Yukawa. Miuonul poate avea atât sarcină negativă ($\mu^-$), cât şi pozitivă ($\mu^+$). După proprietăţile sale, el este un electron foarte greu, instabil, cu timpul mediu de viaţă de aproximativ $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s.

Mezonul lui Yukawa a fost descoperit abia în anul 1947 de către fizicianul englez Cecil Franck Powell (1903–1969) şi colaboratorii săi tot în razele cosmice. El a fost numit **mezon** $\pi$ sau **pion** şi există în trei stări: cu sarcina pozitivă ($\pi^+$), negativă ($\pi^-$) şi nulă ($\pi^0$). Pionii $\pi^+$ şi $\pi^-$ au masa de $\approx 273\ m_e$, iar $\pi^0$ – de $\approx 264\ m_e$.

Sub conducerea lui Powell a fost descoperit şi **mezonul** *K*, numit şi **kaon**, care are masa mai mare decât cea a pionului. Kaonul, de asemenea, este implicat în interacţiunea dintre nucleoni. Este important de remarcat că toţi mezonii sunt particule elementare instabile, care se dezintegrează şi se transformă în alte particule.

Pentru prezicerea teoretică a mezonilor şi pentru descoperirea lor experimentală, Yukawa în anul 1949 şi, respectiv, Powell în 1950 au fost distinşi cu Premiul Nobel.

A fost confirmată experimental şi ipoteza lui W. Pauli (vezi *subtema 7.3, a*) despre existenţa **neutrinului** – particulă elementară neutră din punct de vedere electric, cu o putere de penetrare extrem de mare datorită masei sale foarte mici (poate chiar egală cu zero).

Odată cu dezvoltarea tehnicii de construcţie a acceleratoarelor de particule cu energii mari, au avansat şi posibilităţile experimentale de studiu ale particulelor elementare (vezi principiul de funcţionare a acceleratoarelor de particule elementare în tema 1.4). Au fost descoperite particule masa cărora este mai mare decât cea a protonilor şi neutronilor, numite **hiperoni**. De exemplu, masa hiperonului $\Omega^-$ este de 3 273 $m_e \approx 1{,}78\ m_p$. Există mai multe tipuri de hiperoni, toţi instabili, dezintegrându-se în nucleoni şi particule mai uşoare (pioni, electroni, neutrini etc.).

Cu ajutorul acceleratoarelor în anii 1960–1970 a fost descoperit un număr mare de particule elementare instabile, numite **rezonanţe**. Durata medie de viaţă a acestora este extrem de mică, de ordinul $10^{-24} \div 10^{-23}$ s.

În prezent sunt cunoscute circa 400 de particule elementare, dintre care cele mai multe sunt rezonanţele. Majoritatea particulelor elementare sunt instabile, particule stabile existând doar câteva: fotonul, electronul, neutrinul şi protonul. Neutronul liber are durata medie de viaţă de aproximativ $10^3$ s.

## b. Particule şi antiparticule

În anul 1928, fizicianul englez Paul Dirac a elaborat teoria relativistă a mişcării electronului în atom. Această teorie nu numai că a confirmat rezultatele experimentale cunoscute, dar şi a demonstrat că există o particulă elementară, care posedă caracteristici identice cu cele ale electronului, însă cu sarcină opusă, pozitivă. Generalizând raţionamentele, Dirac a ajuns la concluzia că trebuie să existe nu numai electroni pozitivi, dar şi protoni cu sarcină negativă. Aceste particule au fost numite **antiparticule**. În teoria fizicii particulelor elementare se consideră că pentru toate particulele există şi antiparticule corespunzătoare, chiar dacă în unele cazuri (de exemplu, fotonul) particulele şi antiparticulele coincid.

Prima antiparticulă – electronul pozitiv prezis de Dirac – a fost observată pentru întâia oară în anul 1932 de către C. Anderson. Studiind mii de fotografii ale traiectoriilor particulelor din razele cosmice înregistrate în camera Wilson, Anderson a observat câteva urme care se deosebeau de cele lăsate de electroni numai prin deviaţia de sens opus. Experienţa a demonstrat că urma înregistrată în camera Wilson era traiectoria unui electron cu sarcină pozitivă, adică a unui antielectron, numit **pozitron** (de la lat. *pozitivus* „pozitiv"), notat cu simbolul $e^+$.

Ulterior au fost descoperite şi alte antiparticule: antimiuonul $\mu^+$ (1936), antipionul $\pi^-$ (1947) şi antineutrinul electronic $\tilde{\nu}_e$ (1953), antiprotonul $\tilde{p}$ (1955) şi antineutronul $\tilde{n}$ (1956). Deseori antiparticula se notează cu acelaşi simbol ca particula, dar cu tildă.

**Procesul de interacţiune a unei particule elementare cu antiparticula sa, în urma căruia acestea se transformă în fotoni (radiaţie electromagnetică) sau în alte particule elementare se numeşte *anihilare*.**

Procesul de anihilare la ciocnirea electronului cu pozitronul a fost enunţat mai întâi teoretic de către Dirac. După descoperirea pozitronului a fost observată experimental anihilarea electron–pozitron însoţită de apariţia a doi fotoni (a două cuante $\gamma$):

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\,\gamma. \qquad (7.28)$$

Energia minimă a fotonilor creaţi în urma anihilării: $E_{\min} = 2\,m_e c^2 \approx 2 \cdot 0{,}51$ MeV$= 1{,}02$ MeV.

Studiul interacţiunii radiaţiilor $\gamma$ de anumite energii cu substanţa a evidenţiat un nou fenomen – **formarea de perechi**. De exemplu, perechea electron–pozitron se formează doar dacă radiaţia $\gamma$ are energia minimă egală cu dublul energiei de repaus a electronului, adică cu 1,02 MeV. În acest caz are loc reacţia:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+, \qquad (7.29)$$

semnalată în anul 1933 de către soţii Irène şi Frederic Joliot-Curie.

Din relaţiile (7.28) şi (7.29) rezultă că procesul de formare a perechilor este invers celui de anihilare. Evident că pentru formarea altor perechi de particule este necesară o energie minimă mai mare, egală cu dublul energiei de repaus a particulei respective. În procesul de anihilare, aceeaşi energie va fi eliberată sub formă de radiaţie $\gamma$. De exemplu, în cazul perechii proton–antiproton această energie este de 1 867 MeV, adică aproape de 2 000 de ori mai mare decât în cazul perechii electron–pozitron.

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC
(1902–1984)
*fizician englez*

Este unul dintre fondatorii mecanicii cuantice. A efectuat cercetări teoretice fundamentale în mecanica şi electrodinamica cuantică, teoria cuantică a câmpului şi a particulelor elementare. În anii 1926–1927 a elaborat aparatul matematic al mecanicii cuantice, propunând metoda de cuantificare secundară, utilizată şi în prezent. A elaborat teoria relativistă a mişcării electronului, propunând ecuaţia de undă care îi poartă numele (ecuaţia lui Dirac). În baza acesteia, a prezis existenţa electronului încărcat pozitiv – a pozitronului, observat în razele cosmice. În anul 1931 a emis ipoteza despre existenţa antiparticulelor şi despre crearea şi anihilarea perechilor electron–pozitron, iar în 1933 – despre existenţa antimateriei.
Pentru cercetările care au pus bazele mecanicii cuantice P. Dirac împreună cu E. Shrödinger în anul 1933 au fost distinşi cu Premiul Nobel.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ce se numește particulă elementară?
2. Existența cărei particule a fost prezisă de Yukawa? Care sunt proprietățile acesteia?
3. Care sunt proprietățile miuonului și ale pionului? Prin ce se deosebesc aceste proprietăți?
4. Ce reprezintă kaonii?
5. Ce particularitate este comună tuturor mezonilor?
6. Ce reprezintă hiperonii?
7. Care particule au fost numite rezonanțe?
8. Care sunt particulele elementare stabile?
9. Ce reprezintă antiparticulele?
10. Care particulă a fost numită pozitron? Prin ce se deosebește ea de electron?
11. Ce se numește anihilare? Scrieți reacția de anihilare electron–pozitron.
12. În ce constă esența fenomenului formării de perechi? În ce condiții se formează perechea electron–pozitron? Scrieți reacția respectivă.

## 7.8.* INTERACȚIUNI FUNDAMENTALE. CLASIFICAREA PARTICULELOR ELEMENTARE

Proprietățile și comportamentul multitudinii de particule elementare pot fi cercetate numai în procesele de interacțiune. În natură se realizează patru tipuri de interacțiuni care nu se reduc la altele mai simple. Acestea sunt interacțiunile **tari** (nucleare), **electromagnetice**, **slabe** și **gravitaționale**. Ele au fost numite **interacțiuni fundamentale**.

Mai cunoscute prin efectele produse sunt interacțiunile gravitaționale și cele electromagnetice.

***Interacțiunile gravitaționale*** au un caracter universal, se realizează cu participarea tuturor corpurilor din Univers și sunt descrise de legea atracției universale a lui Newton. Mărimea forțelor de interacțiune este în funcție de masele corpurilor ce interacționează. De aceea în lumea particulelor elementare de mase extrem de mici, forțele de interacțiune gravitațională sunt neglijabile. Ele au un rol decisiv doar la interacțiunea obiectelor masive – stele, planete, asteroizi etc.

***Interacțiunile electromagnetice*** se produc între oricare particule încărcate electric într-un domeniu foarte extins de fenomene ale naturii. Datorită lor este posibilă existența atomilor și moleculelor, a forțelor de frecare și de elasticitate, a undelor electromagnetice, în particular, a luminii. Interacțiunile electromagnetice determină foarte multe proprietăți ale substanțelor aflate în stare solidă, lichidă sau gazoasă, cauzează procesele de absorbție și emisie a fotonilor de către atomi și molecule. Acțiunea forțelor coulombiene conduce la instabilitatea nucleelor cu numere de masă mari (datorită respingerii dintre protoni) și la apariția fotonilor, ca rezultat al anihilării perechii electron–pozitron.

***Interacțiunile tari*** sunt cele mai puternice dintre toate cele cunoscute. Datorită lor se realizează legătura dintre protoni și neutroni în nucleele atomilor. Toate procesele în care sunt antrenate interacțiunile tari se realizează cu viteze foarte mari, adică se produc într-un interval de timp foarte mic, de ordinul $10^{-22}$ s. Se manifestă la distanțe de ordinul $10^{-15}$ m și mai mici, de aceea mai sunt numite **forțe cu rază mică de acțiune**. La asemenea distanțe interacțiunile tari sunt de sute de ori mai puternice decât cele electromagnetice.

***Interacțiunile slabe*** sunt cele mai lente dintre toate interacțiunile care au loc în lumea particulelor elementare, se produc în intervale de timp de ordinul $10^{-10}$ s și mai mari. Ele au loc între orice particule elementare, cu excepția fotonilor. Raza de acțiune a forțelor interacțiunilor slabe este foarte mică, de ordinul $10^{-18}$ m. Interacțiunile slabe se produc în procesele cu participarea neutrinilor sau antineutrinilor, dar și în cele de dezintegrare a particulelor cu timpul mediu de viață mai mare de $10^{-10}$ s.

S-a constatat că toate interacțiunile fundamentale se realizează conform unuia și aceluiași mecanism – prin schimbul de anumite particule purtătoare ale interacțiunii cercetate. Din această cauză ele au fost numite **interacțiuni de schimb**. De exemplu, interacțiunea electromagnetică dintre particulele încărcate are loc prin intermediul schimbului de fotoni – cuante ale câmpului electromagnetic.

Teoria interacțiunii de schimb a fost confirmată prin descoperirea mezonilor $\pi$ (pionilor), prin intermediul cărora se realizează interacțiunea dintre nucleonii nucleelor atomice. În anul 1957 a fost demonstrată teoretic existența unor particule grele, numite **bozoni vectoriali**, care aveau rolul de purtători ai interacțiunilor slabe, iar în 1983 ei au fost descoperiți experimental, astfel confirmându-se caracterul interacțiunii de schimb și pentru aceștia.

În teoria contemporană a gravitației se demonstrează că și interacțiunea gravitațională se manifestă ca o interacțiune de schimb, purtătorul acesteia fiind **gravitonul** – cuantă a câmpului gravitațional, care, asemenea fotonului, este o particulă fără masă. Din cauza intensității foarte mici a interacțiunii gravitaționale, până în prezent gravitonul încă nu a fost detectat experimental.

Cercetările teoretice și experimentale efectuate în domeniul particulelor elementare au pus în evidență posibilitatea clasificării lor într-un sistem ordonat în funcție de proprietățile pe care le posedă.

În funcție de interacțiunea fundamentală realizată, în procesele cu participarea particulelor elementare, ele se împart în trei clase: **fotoni**, **leptoni** și **hadroni**.

Din clasa fotonilor face parte o singură particulă elementară – **fotonul**. El nu are sarcină electrică, dar este purtătorul forțelor de interacțiune electromagnetică. Fotonul este stabil, are timpul de viață infinit de mare până la interacțiunea cu alte particule elementare. Prin intermediul fotonilor se obține cea mai mare parte din informația despre natură: de la stările energetice ale atomilor și moleculelor până la radiația emisă de obiectele din spațiul cosmic. În stare liberă fotonul poate fi considerat cea mai răspândită particulă elementară din Univers.

Particulele care nu participă la procesele de interacțiune tare se numesc **leptoni**.

Clasa leptonilor conține 12 particule elementare (6 particule și 6 antiparticule), care constituie 3 generații – electronul $e^-$ cu neutrinul electronic $\nu_e$, miuonul $\mu^-$ cu neutrinul miuonic $\nu_m$ și taonul $\tau^-$ cu neutrinul taonic $\nu_\tau$. Atât miuonul, cât și taonul sunt particule instabile. Datorită energiilor de repaus mari, aceste particule se pot transforma în altele, de mase mai mici, caracterizate de anumite impulsuri și energii cinetice.

Cercetările experimentale și teoretice efectuate până în prezent demonstrează că leptonii nu au structură internă. De aceea cei 12 leptoni, 6 particule (electronul, miuonul și taonul cu neutrinii lor) și 6 antiparticule respective, mai sunt numite **particule fundamentale**.

Cea mai numeroasă clasă a particulelor elementare (peste 300) o constituie **hadronii** (de la gr. *hadros* „tare, puternic"). Procesele de transformare a hadronilor se realizează prin intermediul tuturor interacțiunilor fundamentale, însă la distanțe mici predomină interacțiunile tari. Cu excepția protonului, care este o particulă stabilă, toți hadronii sunt instabili, se dezintegrează. Dacă dezintegrarea se produce datorită interacțiunilor electromagnetice sau slabe, timpul mediu de viață este mai mare de $10^{-20}$ s, iar dacă pe seama celor tari, atunci în urma dezintegrării apar particulele numite **rezonanțe** cu timpul mediu de viață de ordinul $10^{-23}$ s.

Hadronii se împart în **mezoni** (de la gr. *mesos* „mediu") și **barioni** (de la gr. *barys* „greu"). La rândul lor, barionii se împart în **nucleoni** (protonul și neutronul) și **hiperoni** (particule mai grele decât nucleonii).

În anul 1963, fizicienii americani Murray Gell-Mann (n. 1929) și George Zweig (n. 1937) au emis ipoteza că hadronii sunt particule compuse. Conform acesteia, nucleonii, de exemplu, sunt compuși din trei particule mai mici încărcate electric, numite **quarkuri**. Existența lor a fost confirmată în anul 1969 în urma experimentului similar celui al lui Rutherford, care prin împrăștierea particulelor $\alpha$ a demonstrat existența nucleului. La bombardarea protonilor și a neutronilor cu electroni accelerați până la energii de 50 GeV, s-a constatat existența a trei sarcini punctiforme ce se deplasează liber în interiorul lor. Aceste sarcini punctiforme (particule) sunt quarkurile.

Una dintre particularitățile caracteristice ale quarkurilor este sarcina electrică fracționară.

Deși teoria quarkurilor a fost confirmată experimental, până în prezent încă nu s-a observat niciun quark în stare liberă.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Care interacțiuni sunt numite fundamentale? Numiți-le.
2. Caracterizați fiecare interacțiune fundamentală și indicați care particule iau parte la ele?
3. Ce reprezintă interacțiunea de schimb?
4. Care sunt particulele purtătoare ale fiecărei interacțiuni fundamentale?
5. Cum se clasifică particulele elementare în funcție de interacțiunea fundamentală realizată?
6. Care sunt caracteristicile fotonului?
7. Care particule sunt numite leptoni? Enumerați leptonii din cele trei generații.
8. Care particule elementare se numesc hadroni?
9. Cum se clasifică hadronii?
10. Ce reprezintă quarkurile? Care este esența experienței ce confirmă existența lor?

Capitolul 8

# ELEMENTE DE ASTRONOMIE

## 8.1. ASTRONOMIA ÎN CADRUL ȘTIINȚELOR FIZICE

### a. Obiectul și problemele fundamentale ale astronomiei

Astronomia este una dintre cele mai vechi științe. Ea a luat naștere ca răspuns la nevoile practice ale păstorilor și agricultorilor din Antichitate. Primele cunoștințe astronomice s-au cristalizat acum patru-cinci mii de ani la popoarele din Babilon, Egipt (*fig. 8.1, 8.2*), China și se refereau la orientarea după aștrii cerești și la măsurarea timpului. În Europa s-au păstrat până în zilele noastre vestigiile unor construcții care, probabil, serveau și pentru observații astronomice, cum ar fi monumentul megalitic de la Stonehenge (Anglia) (*fig. 8.3*), sanctuarul de la Sarmizegetusa Regia (România) (*fig. 8.4*) ș.a. Termenul „astronomie" provine de la cuvintele grecești *astron* „astru, stea" și *nomos* „lege".

***Astronomia* studiază mișcarea, structura, originea și evoluția corpurilor cerești și a sistemelor formate de ele.**

*Fig. 8.1.* Astrologi babilonieni

Printre problemele fundamentale abordate de astronomie se numără: **determinarea poziției, mișcării în spațiu, a formei și dimensiunilor corpurilor cerești; studiul structurii, proprietăților fizice și al compoziției chimice a aștrilor; problema originii și evoluției corpurilor cerești, a Pământului, Universului.**

Este de menționat că astronomia a avut și continuă să aibă un rol esențial în dezvoltarea civilizației umane. Metodele de determinare a orei exacte, a coordonatelor geografice, a distanțelor la corpurile cerești și a vârstei acestora au fost elaborate în astronomie. Este incontestabil rolul primordial al astronomiei în cercetarea spațiului cosmic.

*Fig. 8.2.* Piramidele din Giza (Egipt) (sec. XXV î.Hr.)

Astronomia are legături strânse cu multe alte științe: fizica, matematica, cibernetica, chimia, biologia, geografia, geologia. Odată cu aplicarea metodelor acestor științe în astronomie, a devenit posibilă studierea materiei în stări și condiții care nu ar putea fi realizate în laboratoarele terestre. Astfel, astronomii reușesc să cerceteze procesele fizice care se desfășoară în regiunile cele mai îndepărtate ale Universului. Alături de alte științe,

*Fig. 8.3.* Monumentul preistoric Stonehenge (Anglia) (2400–2200 î.Hr.)

*Fig. 8.4.* Sanctuarul de la Sarmizegetusa Regia (România) (sec. III–II î.Hr.)

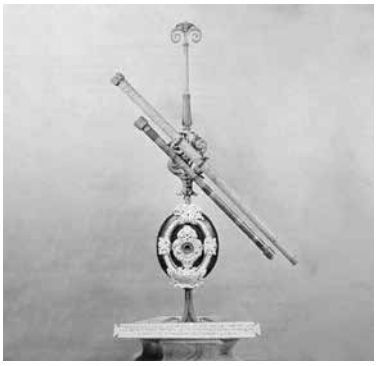


*Fig. 8.5.* Telescopul (luneta) lui Galileo Galilei (a. 1609)

*Fig. 8.6.* Telescop-reflector școlar

**E BINE SĂ MAI ȘTIȚI**

În Antichitate nu se făcea o distincție clară între astronomie și astrologie. Astrologia a atins apogeul dezvoltării sale în Babilonul antic (1900–538 î.Hr.), unde una și aceeași persoană avea rolul de astronom și de astrolog.
Din punctul de vedere al științei contemporane, astrologia nu poate fi calificată ca o știință, pentru că ea nu se bazează pe legile naturii descoperite și verificate experimental.

astronomia ne oferă posibilitatea de a cunoaște natura și manifestările ei, contribuind astfel la formarea concepției științifice despre lume.

În funcție de problemele fundamentale pe care le abordează, astronomia modernă se împarte în mai multe ramuri strâns legate între ele: astrometrie, astronomie teoretică, mecanică cerească, astrofizică, astronomie stelară, cosmogonie, cosmologie.

## b. Metodele de cercetare astrofizică

Astăzi una dintre cele mai importante ramuri ale astronomiei este **astrofizica**. S-a constituit ca ramură a astronomiei odată cu descoperirea în secolul XIX a analizei spectrale.

***Astrofizica* studiază structura, proprietățile fizice și compoziția chimică a corpurilor cerești, precum și procesele care au loc în ele.**

În astrofizică se aplică legile și metodele de cercetare ale fizicii moderne, însă există și un șir de particularități. În primul rând, observatorul nu poate influența sau modifica condițiile fizice și fenomenele care se produc în corpurile cerești studiate. În al doilea rând, noi observăm poziția și mișcările corpurilor cerești de pe Pământ, care, la rândul său, este în mișcare de rotație în jurul axei și în mișcare de revoluție în jurul Soarelui, fapt care complică analiza fenomenelor astronomice studiate. În al treilea rând, obiectele cosmice observate se află la distanțe enorme de Pământ. De aceea radiațiile venite de la ele au intensitatea extrem de mică, ceea ce necesită utilizarea unor instrumente de înaltă precizie foarte sensibile. Aceste particularități ale astrofizicii impun noi metode de cercetare și instrumente speciale de observare.

Radiația (lumina) emisă de corpurile cerești este studiată cu ajutorul telescoapelor optice (*fig. 8.5, 8.6, 8.7*). Telescoapele moderne sunt dotate cu spectrometre și alte instrumente instalate atât la sol, cât și la bordul aparatelor spațiale. Observațiile și cercetările astrofizice se efectuează la observatoare astronomice (*fig. 8.8, 8.9*).

În secolul XX, observațiile astrofizice s-au extins practic pe toate lungimile de undă, de la razele gama la undele radio. Au luat naștere noi ramuri ale astronomiei, cum ar fi **radioastronomia, astronomia în raze X (Röntgen) și gama, astronomia neutrinică, astronomia extraatmosferică bazată pe utilizarea sateliților artificiali și a sondelor spațiale.**

Energia radiată de corpurile cerești constituie unica sursă de informație despre proprietățile fizice și compoziția lor chimică. Datele științifice referitoare la corpurile cerești se obțin din analiza spectrală a acestei radiații. Prin metoda respectivă se poate determina *compoziția chimică, viteza radială, temperatura, câmpul magnetic, perioada de rotație a astrului* etc.

Pentru cercetarea undelor radio emise de sursele cosmice se folosesc instrumente speciale numite radiotelescoape (*fig. 8.10*). Cu ajutorul lor

a fost descoperită radiația radio emisă de Soare, au fost detectate unde radio emise de Jupiter, Venus și Marte. Prin metoda *radiolocației* se poate determina cu mare precizie distanța până la planete, asteroizi etc.

Aplicarea metodelor și instrumentelor moderne de observare și cercetare în astrofizică s-a soldat în ultimele decenii cu un șir de descoperiri științifice remarcabile, cum ar fi: *quasarii*, *pulsarii*, *radiația radio cosmică de fond* ș.a.

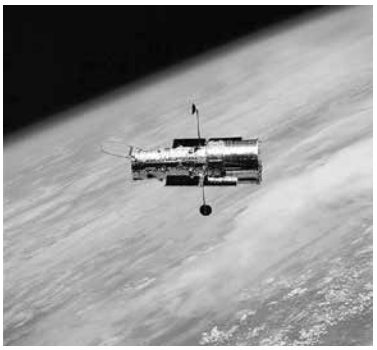


*Fig. 8.7.* Telescopul spațial Hubble

## 8.2. ELEMENTE DE ASTRONOMIE PRACTICĂ

### a. Mișcarea aparentă a stelelor. Constelațiile

• **Mișcarea aparentă a stelelor.** Pământul se rotește în jurul axei proprii, în direcția de la vest la est, adică în sens opus mișcării ácelor de ceasornic, dacă este privit de la Polul Nord. Nouă însă ni se pare că cerul nocturn se rotește în sens contrar în jurul unei axe imaginare care trece prin ochiul observatorului. Această rotație aparentă a bolții cerești, împreună cu aștrii de pe ea, este numită **mișcare diurnă**. Ca rezultat al mișcării diurne, stelele și alte corpuri cerești își schimbă continuu poziția față de orizont.

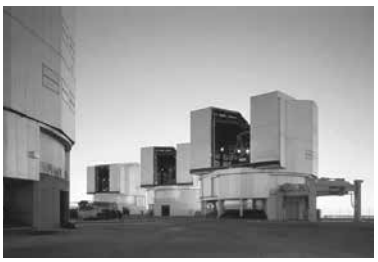


*Fig. 8.8.* Observatorul European de Sud, Cerro Paranal (Chile)

Privind partea de nord a cerului, vom constata că unele stele răsar și apun, iar altele descriu cercuri închise, rotindu-se în jurul unui punct fix numit **polul nord al cerului**. Dreapta care trece prin polul nord al cerului și prin ochiul observatorului este numită **axa lumii**. Rotația diurnă a bolții cerești are loc în jurul axei lumii. Poziția polului nord ceresc coincide aproximativ cu poziția stelei α din constelația Ursa-Mică, numită și **Steaua Polară**. Punctul de pe cer diametral opus polului nord al cerului se numește **polul sud al cerului**.

*Fig. 8.9.* Observatorul Universității de Stat din Moldova (foto Șt. Tiron)

Mișcarea diurnă aparentă a stelelor poate fi pusă în evidență fotografiind într-o noapte senină, fără lună, cerul din jurul Stelei Polare (*fig. 8.11*) cu un timp de expunere de câteva ore. Pe imaginea obținută vom vedea arce de cerc concentrice – urme ale deplasării stelelor (*fig. 8.12*). Centrul comun al acestor arce, adică punctul care a rămas fix în mișcarea diurnă a stelelor, este tocmai **polul nord al cerului**.

Ca și stelele, Soarele, Luna și planetele răsar în partea de est a orizontului, ating înălțimea maximă în partea de sud și apun în partea de vest

*Fig. 8.10.* Radiotelescoape

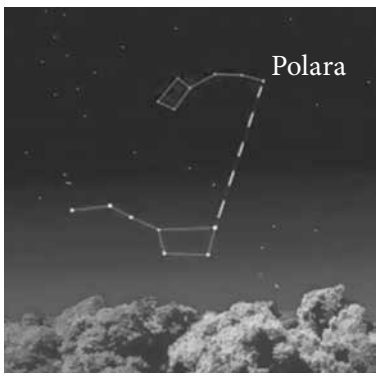



*Fig. 8.11.* Steaua Polară, constelațiile Ursa-Mare și Ursa-Mică

*Fig. 8.12.* Regiunea circumpolară a cerului

a orizontului. Urmărind însă zi de zi acești aștri, vom observa că, spre deosebire de stele, de la o zi la alta fiecare dintre ei răsare și apune în diferite puncte ale orizontului.

• **Constelaţiile.** Cu ochiul liber pot fi observate aproximativ 6 mii de stele (în ambele emisfere). Când privim cerul înstelat, avem senzaţia că toţi aștrii de pe *bolta cerească* se află la aceeași distanţă de noi. Poziţiile relative ale stelelor pe cer se schimbă foarte lent, ele rămânând practic constante mii de ani. De aceea stelele par a fi fixe și aceasta ne permite să le recunoaștem cu ușurinţă, deși, la prima vedere, ele sunt împrăștiate haotic pe cer.

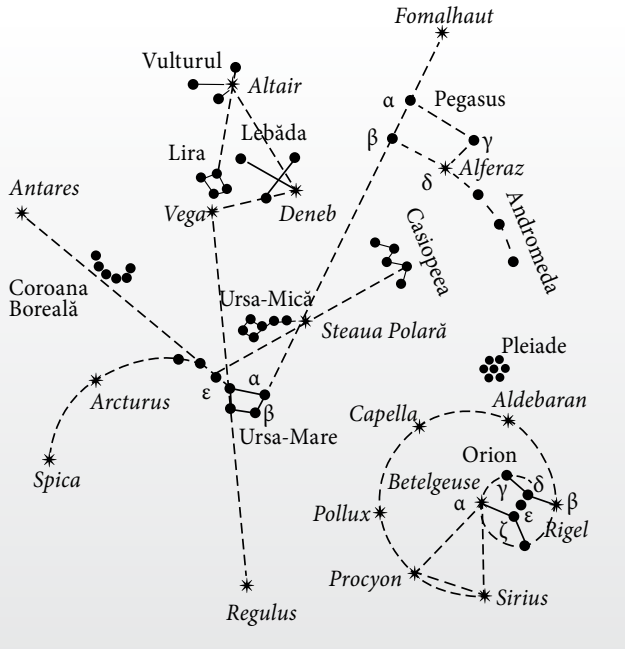



*Fig. 8.13.* Constelaţii și stele mai strălucitoare (Levitan E.P.)

În Antichitate, pentru a facilita orientarea pe cer, stelele mai strălucitoare erau reunite în grupuri, numite *constelaţii* (*fig. 8.13*).

**În prezent, *constelaţie* este numită o porţiune a cerului înstelat cuprinsă în hotare bine determinate.**

Sfera cerească este împărţită în 88 de constelaţii, aprobate de Congresul I al Uniunii Astronomice Internaţionale (Roma, Italia, a. 1922).

Unele constelaţii au denumiri legate de mitologia greacă, cum ar fi, de exemplu, Andromeda, Perseu, Pegasus, Leul, Racul, Ursa-Mare etc. Există constelaţii care au nume sugerate de configuraţiile stelelor componente (Triunghiul, Balanţa, Coroana Boreală, Crucea-Sudului ș.a.) sau de instrumente științifice (Telescopul, Sextantul). Constelaţiile pot fi ușor recunoscute pe bolta cerească după configuraţiile specifice, formate de cele mai strălucitoare stele ale lor.

Începând din secolul XVII, stelele componente ale constelaţiilor sunt notate cu literele alfabetului grecesc, în ordinea descreșterii strălucirii. După atribuirea tuturor literelor acestui alfabet, se folosește alfabetul latin, apoi cifrele arabe. Cea mai strălucitoare stea este notată, de regulă, cu litera α, stelele următoare, mai puţin strălucitoare – cu literele β, γ etc. Stelele cele mai strălucitoare au și denumiri proprii. De exemplu, steaua α din constelaţia *Lira* e numită *Vega*; steaua α din constelaţia *Orion – Betelgeuse*. Stelele strălucitoare facilitează orientarea pe cer, dar și identificarea stelelor mai slabe sau a altor corpuri cereşti.

**E BINE SĂ MAI ȘTIŢI**

*Constelaţiile zodiacale.* În mișcarea sa anuală aparentă pe ecliptică Soarele trece prin 13 constelaţii, dintre care 12 sunt numite *constelaţii zodiacale* (de la cuvântul grecesc *zoon* „animal"): Peștii, Berbecul, Taurul, Gemenii, Racul, Leul, Fecioara, Balanța, Scorpionul, Săgetătorul, Capricornul și Vărsătorul (*fig. 8.14*).
Cea de-a 13-a constelaţie, Ophiucus, nu este considerată zodiacală.

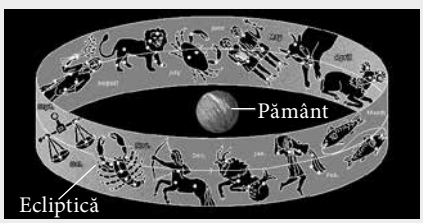



*Fig. 8.14.* Constelaţiile zodiacale

## Verificaţi-vă cunoștinţele

1. Identificaţi pe cer constelaţiile circumpolare folosind harta cerului înstelat (v. p. 161).
2. Folosind harta, identificaţi seara pe cer constelaţiile și planetele vizibile la data respectivă. Notaţi ora observaţiei. Repetaţi observările peste 2-4-6 săptămâni la aceeași oră. Comparaţi rezultatele obţinute și trageţi concluziile.
3. Știind că la distanţa braţului întins pumnul strâns (de la degetul mare la cel mic) acoperă pe cer o porţiune unghiulară de aproximativ 10°, estimaţi dimensiunile unghiulare ale unor constelaţii.
4. Urmăriţi și treceţi pe caietul de observaţii constelaţiile prin care Luna trece în lunile de primavară. Ce aţi constatat?

## b. Sfera cerească și elementele ei

Pentru a studia mișcarea aparentă a aștrilor, este necesar să se cunoască poziția lor la momentul observării. Toți aștrii de pe cer se află aparent pe partea interioară a unei sfere de rază arbitrară, în centrul căreia este observatorul. Poziția unui astru este definită de raza dusă din locul de observație spre astrul respectiv.

**Sfera imaginară de rază arbitrară având centrul într-un punct de pe suprafața (sau în centrul) Pământului, pe a cărei suprafață interioară se proiectează corpurile cerești la un moment dat, se numește *sferă cerească*** (*fig. 8.15*).

Observatorul se află în centrul sferei cerești. Sfera cerească este utilizată încă din Antichitate pentru determinarea poziției și mișcării corpurilor cerești. În acest scop, pe suprafața ei se definesc mai multe linii, puncte și plane (*fig. 8.15*), față de care se determină coordonatele cerești și se efectuează măsurările necesare.

• **Elementele sferei cerești.** În *figura 8.15* dreapta ZZ' care trece prin centrul O al sferei cerești în direcția forței de greutate se numește **verticala locului**. Ea intersectează sfera cerească în două puncte: **zenit**, Z, și punctul diametral opus, **nadir**, Z'.

Cercul mare al sferei cerești, SWNES, al cărui plan este perpendicular pe verticala ZZ' se numește **orizontul adevărat** sau **matematic**. Orizontul matematic împarte sfera cerească în emisfera vizibilă pentru observator, cu vârful în zenit, Z, și cea invizibilă, cu vârful în nadir, Z'. Orizontul matematic nu coincide cu orizontul aparent. Pe mare, orizontul aparent este un cerc mic, al cărui plan este paralel cu planul orizontului matematic.

Axa PP' în jurul căreia are loc mișcarea aparentă a sferei cerești este numită **axa lumii**. Aceasta este paralelă sau coliniară cu axa de rotație a Pământului. Ea intersectează suprafața sferei cerești în două puncte, numite **polul nord al cerului**, P, și **polul sud al cerului**, P'.

Cercul mare al sferei cerești, QWQ'EQ, al cărui plan este perpendicular pe axa lumii se numește **ecuatorul ceresc**. Ecuatorul ceresc împarte sfera cerească în două emisfere: emisfera de nord cu polul nord ceresc, P, și emisfera de sud cu polul sud ceresc, P'. Ecuatorul ceresc intersectează orizontul matematic în două puncte: **punctul cardinal est**, E, și **punctul cardinal vest**, W (*fig. 8.15*).

Cercul mic al sferei cerești, bMb'b, al cărui plan este paralel cu planul ecuatorului ceresc se numește **paralel diurn** al astrului M. Mișcarea diurnă aparentă a stelelor se produce pe paralele diurne.

Cercul mare al sferei cerești, PZQSP'Z'Q'NP, al cărui plan trece prin verticala locului și axa lumii se numește **meridian ceresc**. Meridianul ceresc împarte sfera cerească în două emisfere: emisfera de est, cu punctul cardinal est, E, și emisfera de vest, cu punctul cardinal vest, W.

Meridianul ceresc intersectează orizontul matematic în două puncte: **punctul cardinal nord**, N, și **punctul cardinal sud**, S. Planul meridianului ceresc intersectează planul orizontului matematic pe dreapta NS, numită **meridiana locului**.

## c. Mișcarea anuală aparentă a Soarelui. Ecliptica

Spre deosebire de stele, Soarele și Luna, în locul dat de pe Pământ, își schimbă mereu momentul și punctele în care răsar și apun, precum și înălțimea maximă față de orizont. Poziția Soarelui și a Lunii pe bolta cerească variază datorită înclinației axei Pământului, mișcării de revoluție a Pământului în jurul Soarelui și, respectiv, a Lunii în jurul Pământului.

Ca urmare a mișcării orbitale a Pământului, în decursul anului, Soarele se deplasează aparent pe fondul cerului înstelat cu circa 1° pe zi, de la vest la est (adică în sens opus rotației diurne a bolții cerești).

**Drumul anual aparent al Soarelui pe sfera cerească este numit *ecliptică*.**

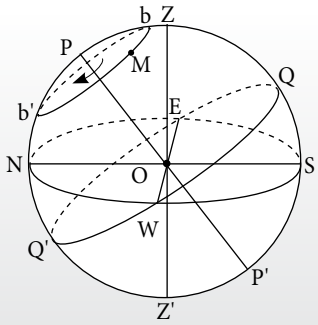



*Fig. 8.15.* Sfera cerească

**E BINE SĂ MAI ȘTIȚI**

Dreapta perpendiculară pe planul eclipticei care trece prin centrul sferei cerești se numește *axa eclipticei* (*fig. 8.16*). Ea intersectează sfera cerească în două puncte: *polul nord al eclipticei* și *polul sud al eclipticei*. Ecliptica intersectează ecuatorul ceresc în două puncte numite *echinocțiale*: *punctul vernal* (punctul echinocțiului de primăvară) și *punctul autumnal* (punctul echinocțiului de toamnă).

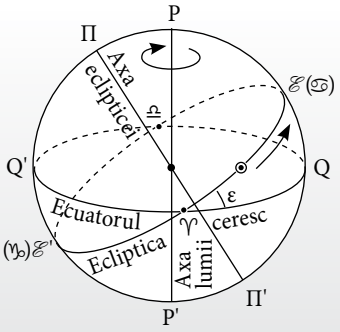



*Fig. 8.16.* Ecliptica și ecuatorul ceresc

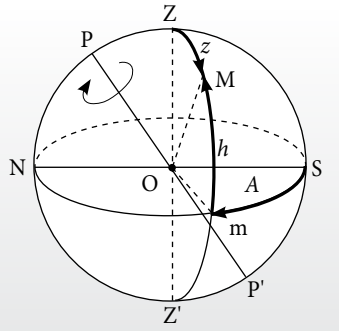



*Fig. 8.17.* Coordonatele orizontale

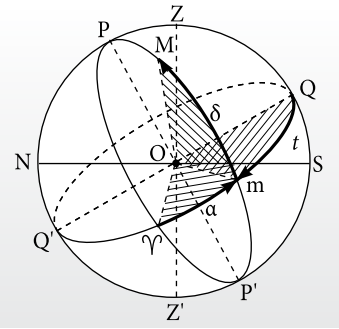



*Fig. 8.18.* Coordonatele orare și coordonatele ecuatoriale

Axa de rotație a Pământului nu este perpendiculară pe planul orbitei sale, ci e înclinată cu un unghi de 66°34′. În consecință, planul eclipticei formează un unghi ε = 23°26′ cu planul ecuatorului ceresc (*fig. 8.16*).

## d. Sistemele de coordonate cerești. Culminația aștrilor. Echinocțiile și solstițiile

Poziția aștrilor pe cer poate fi determinată în diferite sisteme de coordonate cerești. Printre sistemele principale de coordonate cerești care se aplică pe larg în astronomia practică se numără coordonatele cerești orizontale și cele ecuatoriale.

**Coordonatele cerești orizontale.** Coordonatele orizontale sunt *înălțimea* astrului deasupra orizontului, *h,* și *azimutul, A* (*fig. 8.17*).

Cercul mare al sferei cerești, ZMZ', care trece prin zenit, Z, prin astrul M și nadir, Z', se numește *cercul vertical* al astrului M.

***Înălțimea, h,* a astrului M este unghiul mOM dintre planul orizontului matematic și direcția spre astru, OM.**

Înălțimea *h* poate lua valori între 0° și +90°, dacă astrul se află deasupra orizontului, sau între 0° și –90°, dacă astrul este sub orizont.

Uneori în locul înălțimii este utilizată o altă coordonată numită *distanța zenitală*, *z,* a astrului M, care este unghiul ZOM între verticala locului ZZ' și direcția spre astru, OM. Distanța zenitală, *z,* ia valori de la 0° la 180°. Între coordonatele *z* și *h* ale unui astru există o relație simplă:

$$z + h = 90^{\circ}.$$

***Azimutul* astrului M este unghiul SOm între planul meridianului ceresc și planul cercului vertical al astrului.**

Azimutul se măsoară de la punctul cardinal sud, S, spre vest în direcția rotației diurne a sferei cerești și poate lua valori între 0° și 360°.

Coordonatele orizontale determină poziția aparentă a astrului și variază în timp datorită rotației diurne a sferei cerești. În practică, ele se măsoară cu ajutorul instrumentului universal sau al teodolitului.

**Coordonatele cerești ecuatoriale.** În astronomie sunt utilizate două sisteme de coordonate cerești ecuatoriale, ambele având drept plan fundamental planul ecuatorului ceresc: coordonatele orare și coordonatele ecuatoriale.

**Coordonatele cereşti orare.** Coordonatele acestui sistem sunt *declinaţia*, δ, şi *unghiul orar*, *t* (*fig. 8.18*).

Cercul mare al sferei cereşti, PMP', care trece prin polii lumii şi prin astrul M se numeşte **cercul orar** sau **cercul de declinaţie** al astrului M.

***Declinaţia, δ,* a unui astru este unghiul dintre planul ecuatorului ceresc şi direcţia spre astru.**

Declinaţia măsurată la nord de ecuatorul ceresc este considerată pozitivă, iar la sud de ecuator – negativă. Aşadar, valorile declinaţiei sunt cuprinse între $0^o$ şi $\pm 90^o$. Declinaţia e similară cu latitudinea geografică.

Poziţia cercului orar al astrului este determinată de cea de a doua coordonată – *unghiul orar, t.*

***Unghiul orar, t*, este unghiul diedru între planul meridianului ceresc şi planul cercului orar al astrului.**

Unghiul orar ia valori în limitele $0^o$–$360^o$ sau $0^h$–$24^h$.

Sistemul de coordonate cereşti orare se foloseşte la măsurarea timpului.

**Sistemul de coordonate cereşti ecuatoriale.** Prima coordonată în acest sistem este aceeaşi *declinaţie*, δ. Cea de a doua coordonată este *ascensia dreaptă,* notată cu α, care e similară cu longitudinea geografică.

***Ascensia dreaptă*, α, a unui astru M este unghiul dintre direcţia spre punctul vernal, ♈, şi planul cercului orar al astrului.**

Această coordonată se măsoară de la punctul vernal, ♈, până la cercul orar al astrului dat, în sens opus rotaţiei diurne a sferei cereşti. Ascensia dreaptă mai frecvent se exprimă în unităţi de timp şi poate lua valori cuprinse între $0^h$ şi $24^h$ (*fig. 8.18*).

Corespondenţa dintre unităţile de timp şi cele unghiulare se stabileşte uşor având în vedere că Pământul (şi, aparent, sfera cerească cu stelele de pe ea) efectuează o rotaţie completă ($360^o$) în 24 de ore. Deci în decurs de o oră sfera cerească se roteşte cu $15^o$, în 4 min. – cu $1^o$ ş.a.m.d.

Sistemul de coordonate ecuatoriale este utilizat în astrometrie la întocmirea cataloagelor şi a hărţilor stelare. Ascensia dreaptă exprimată în unităţi de timp este indicată pe reţeaua de coordonate a hărţilor stelare.

**• Culminaţia aştrilor.** Fenomenul de trecere a unui astru prin meridianul ceresc se numeşte **culminaţia astrului**. Culminaţia este *superioară* atunci când astrul intersectează partea superioară a meridianului ceresc PZQSP' (*fig. 8.15*). Culminaţia este *inferioară* când astrul intersectează partea inferioară a meridianului ceresc, PNQ'Z'P'.

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

*Hărţile stelare* cuprind toate stelele de până la o anumită strălucire din emisfera nordică şi cea sudică a sferei cereşti. De aceea astronomii amatori trebuie să consulte hărţile şi anuarele astronomice (accesibile şi pe Internet).

În cazul aştrilor care nu apun, ambele culminaţii sunt vizibile. Dacă aştrii răsar şi apun, e vizibilă numai culminaţia superioară, cea inferioară având loc sub orizont. Culminaţiile aştrilor care nu răsar au loc sub orizont şi deci nu sunt vizibile.

Momentul culminaţiei superioare a Soarelui se numeşte **amiază adevărată**, iar momentul culminaţiei inferioare – **miezul nopţii adevărat**.

**• Echinocţiile şi solstiţiile.** În mişcarea sa anuală aparentă pe ecliptică Soarele trece, la 21 martie, din emisfera de sud a sferei cereşti în cea de nord, prin **punctul vernal**, ♈ (*fig. 8.16*). Aceasta este ziua *echinocţiului de primăvară*, când durata zilei este egală cu cea a nopţii. În ziua echinocţiului de toamnă, la 23 septembrie, Soarele trece din emisfera de nord în cea de sud a cerului prin **punctul autumnal**, ♎.

Punctele eclipticei, situate la $90^o$ de punctele echinocţiale, se numesc **puncte solstiţiale**, $\mathscr{E}$ şi $\mathscr{E}'$. În emisfera de nord a Pământului, Soarele este în punctul *solstiţiului de vară* în jurul datei de 22 iunie, iar în punctul *solstiţiului de iarnă* – în jurul datei de 21 decembrie.

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

Măsurând înălţimea Soarelui la amiază, adică în momentul culminaţiei superioare, pe parcursul unui an, se poate constata că aceasta variază între anumite limite.

În zilele de echinocţii, traiectoria diurnă a Soarelui este chiar ecuatorul ceresc. Deoarece planul orizontului împarte ecuatorul ceresc în jumătate, în aceste zile porţiunea de drum parcursă de Soare deasupra orizontului este egală cu cea de sub orizont şi, ca urmare, ziua şi noaptea au duratele egale.

În zilele de echinocţii, în locul cu latitudinea geografică φ înălţimea Soarelui la amiază este $h_\odot = 90^o - \varphi$.

În ziua solstiţiului de vară, în locul cu latitudinea geografică φ înălţimea Soarelui la amiază atinge valoarea maximă:

$$h_{max} = 90^o - \varphi + 23^o26'.$$

Aproximativ la 22 decembrie, Soarele, mişcându-se pe ecliptică, coboară sub ecuatorul ceresc cu $23^o26'$. În ziua *solstiţiului de iarnă,* în emisfera de nord a Pământului, cea mai mare parte a drumului diurn aparent al Soarelui se află sub orizont şi de aceea ziua aceasta este cea mai scurtă, iar noaptea – cea mai lungă din an.

În locul cu latitudinea geografică φ, în ziua solstiţiului de iarnă înălţimea Soarelui la amiază este minimă:

$$h_{min} = 90^o - \varphi - 23^o26'.$$

În celelalte zile ale anului înălţimea Soarelui variază între valorile $h_{min}$ şi $h_{max}$.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Calculaţi înălţimea Soarelui la amiaza adevărată în zilele de echinocţii şi solstiţii la Chişinău.
2. Exprimaţi unghiul 28°54′37″ în unităţi de timp.
3. Latitudinea geografică a oraşului Chişinău este φ = 47°05′. Determinaţi distanţa unghiulară dintre zenit şi polul nord al cerului la Chişinău.
4. Oraşul Rio de Janeiro (Brazilia) are latitudinea geografică φ = – 23°03′. Care este unghiul dintre planul ecuatorului ceresc şi planul orizontului în acest oraş?
5. Azimutul unui astru este egal cu 45°, iar înălţimea – cu 60°. În ce parte a cerului trebuie căutat astrul?
6. În ce locuri de pe Pământ înălţimea aştrilor faţă de orizont nu variază în decursul zilei?
7. Cum se poate dovedi că axa de rotaţie a Pământului nu-şi schimbă direcţia în spaţiu în decursul mişcării lui anuale?
8. În care zile ale anului Soarele se află pe ecuatorul ceresc?
9. Soarele este la 128°34′50″ de punctul vernal. Cât este ascensia dreaptă a Soarelui, exprimată în unităţi de timp?
10. Un elev s-a născut la miezul nopţii când steaua θ din constelaţia Capricorn era în culminaţia superioară. În ce constelaţie se afla atunci Soarele?

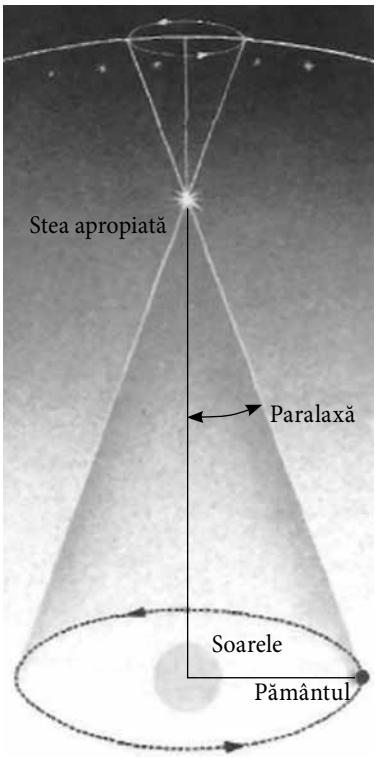



*Fig. 8.19.* Paralaxa anuală

*Fig. 8.20.* Pendulul lui Foucault (Paris, Franța, a. 1851)

### e. Mişcarea periodică a Pământului şi a Lunii. Fazele Lunii. Eclipsele de Soare şi de Lună

• **Mişcarea de revoluţie a Pământului în jurul Soarelui.** Pământul se mişcă în jurul Soarelui pe o orbită eliptică efectuând o rotaţie completă într-un an. Ca urmare, direcţia spre o stea apropiată se schimbă, astfel încât observatorului i se pare că steaua descrie în decursul anului o elipsă pe sfera cerească (*fig. 8.19*). Acest fenomen este numit **paralaxă anuală**.

Paralaxa anuală a stelelor este o dovadă a mişcării de revoluţie a Pământului în jurul Soarelui.

**Să ne amintim**

***Succesiunea anotimpurilor.*** Observaţiile arată că polii cereşti nu-şi schimbă poziţia faţă de stele în decursul anului. De aici rezultă că axa de rotaţie a Pământului rămâne paralelă cu ea însăşi în mişcarea lui de revoluţie în jurul Soarelui.

Mişcarea Pământului în jurul Soarelui, înclinarea axei de rotaţie a Pământului faţă de planul orbitei cu 66°34′ şi faptul că unghiul de înclinaţie rămâne constant – toate acestea au drept consecinţă succesiunea anotimpurilor pe Pământ.

• **Mişcarea de rotaţie axială.** Rotaţia Pământului în jurul axei sale poate fi pusă în evidenţă cu ajutorul unui pendul gravitaţional, experiment realizat pentru prima dată în 1851 de fizicianul francez Foucault (*fig. 8.20*). În câmpul de gravitaţie, pendulul are proprietatea de a-şi păstra invariabilă orientarea în spaţiu a planului de oscilaţie. Dacă, de exemplu, pendulul lui Foucault oscilează la polul nord al Pământului în planul unui anumit meridian, observatorul peste un timp va constata că planul de oscilaţie al pendulului s-a deplasat aparent în sensul rotaţiei ácelor de ceasornic, adică de la est spre vest. Dat fiind faptul că planul de oscilaţie al pendulului nu poate să-şi schimbe direcţia, rezultă că în realitate Pământul se roteşte de la vest spre est.

Rotaţia Pământului în jurul axei sale se manifestă prin succesiunea zilelor şi nopţilor. Ca urmare a rotaţiei Pământului, în zonele tropicale suflă mereu vânturi numite **alizee**, de la nord-est spre sud-vest în emi-

sfera nordică și de la sud-est spre nord-vest în emisfera sudică. Datorită rotației Pământului, în emisfera nordică malul drept al râurilor este mai abrupt din cauza eroziunii, iar în cea sudică – malul stâng. O altă dovadă a rotației Pământului este devierea spre est a corpurilor în cădere. Astfel, un corp lăsat să cadă liber de pe un turn înalt va atinge solul într-un punct deplasat spre est față de peretele turnului.

Numeroase cercetări au arătat că viteza unghiulară de rotație a Pământului nu este constantă, adică rotația lui nu este uniformă. S-a constatat că are loc o încetinire seculară a rotației ca urmare a frânării produse de mareele lunare și solare.

• **Mișcarea Lunii.** Luna efectuează o mișcare de revoluție în jurul Pământului pe o orbită eliptică în 27,32 de zile, această perioadă fiind numită **lună siderală**. În mișcarea sa de revoluție, Luna se deplasează pe cer de la vest la est cu aproximativ 13° pe zi, trecând prin toate constelațiile zodiacale.

Întrucât orbita Lunii nu este circulară, distanța de la Pământ la Lună variază de la 356 375 km în perigeu la 406 720 km în apogeu, distanța medie fiind de 384 400 km. De asemenea, variază și diametrul unghiular aparent al discului lunar – respectiv de la 33′29″ la 29′22″. Acest fapt determină tipul și durata eclipselor de Soare.

• **Fazele Lunii.** Luna, ca și planetele, nu are lumină proprie, ea este văzută datorită luminii Soarelui reflectată de ea.

Ca urmare a mișcării sale de revoluție, Luna își schimbă mereu poziția față de Soare. De aceea aspectul ei pe cer variază prezentând așa-numitele **faze**: lună nouă (1), primul pătrar (2), lună plină (3), ultimul pătrar (4) (*fig. 8.21*). Intervalul de timp dintre două faze consecutive de același fel, numit **lună sinodică**, este egal cu 29,53 de zile.

Luna sinodică este cu 2,2 zile mai lungă decât luna siderală. Această diferență se explică prin faptul că în timpul unei rotații a Lunii în jurul Pământului, acesta, la rândul său, se rotește în jurul Soarelui cu aproximativ 27°, parcurgând circa 1° pe zi. Pentru a reveni la aceeași poziție față de Soare și Pământ, adică la aceeași fază, Luna are nevoie de 2,2 zile ca să parcurgă acest unghi (*fig. 8.22*).

La câteva zile după faza de lună nouă, Luna poate fi văzută seara la vest sub forma unei seceri înguste luminoase în creștere. Partea neiluminată de Soare a discului are o culoare cenușie, care se datorează luminii solare reflectate de suprafața terestră (*fig. 8.23*).

Pentru un observator de pe Lună, Pământul, de asemenea, prezintă faze.

Urmărind cu atenție detaliile de pe discul lunar, se poate observa că acestea sunt mereu aceleași, de unde s-ar putea trage concluzia că Luna nu se rotește în jurul axei sale. În realitate lucrurile stau cu totul altfel: Luna este în mișcare de rotație în jurul axei proprii, însă perioada acestei mișcări este egală exact cu perioada de revoluție a Lunii în jurul Pământului, adică cu 27,32 de zile.

Drept consecință, Luna este orientată mereu cu aceeași față spre Pământ.

• **Eclipsele de Soare.** Soarele este de circa 400 de ori mai mare în diametru decât Luna. În același timp, Soarele este aproximativ de 400 de

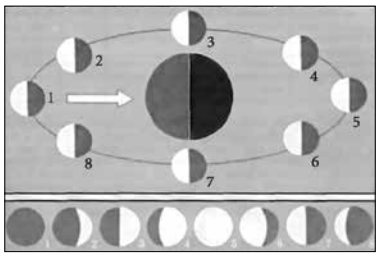


*Fig. 8.21.* Succesiunea fazelor Lunii

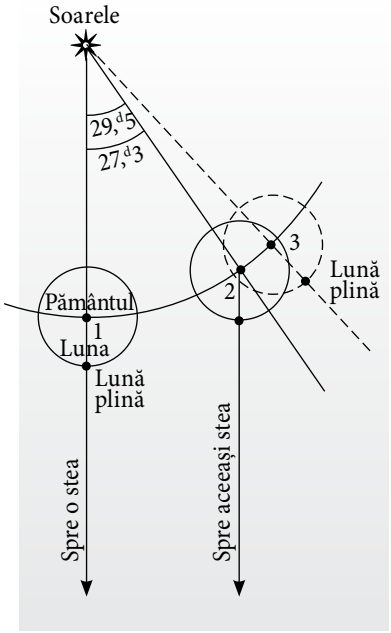


*Fig. 8.22.* Luna sinodică și luna siderală

*Fig. 8.23.* Lumina cenușie a Lunii

ori mai departe de Pământ ca Luna. În consecinţă, atunci când aceste corpuri se aliniază, Luna poate să acopere o parte sau tot discul solar şi atunci are loc o eclipsă de Soare (*fig. 8.24*).

Eclipsele de Soare se produc atunci când Luna este în faza de lună nouă.

Dacă Luna în faza de lună nouă este în perigeul orbitei sale, adică la distanţa minimă de Pământ, iar Pământul în afeliu (la distanţa maximă de Soare), atunci se poate observa o *eclipsă totală* de Soare (cu durata maximă de 7 min. 40 s la ecuatorul Pământului) (*fig. 8.25*). La latitudinea Chişinăului, durata medie a unei eclipse totale de Soare este de 2-2,5 min. Diametrul maxim al umbrei Lunii pe Pământ este de circa 250 km. În timpul eclipsei de Soare, umbra Lunii se deplasează de la vest la est cu viteza de 0,5 km/s pe o distanţă de câteva mii de kilometri. Eclipsa totală de Soare poate fi observată numai în punctele de pe Pământ prin care trece pata de umbră a Lunii (A în *fig. 8.24*). În timpul eclipsei totale pe cer apar aştrii mai strălucitori.

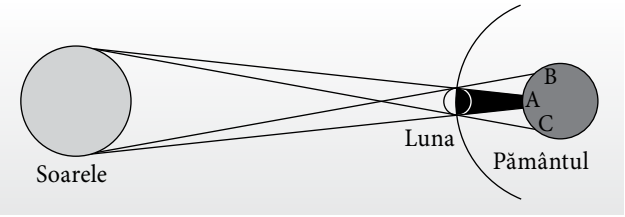



*Fig. 8.24.* Schema eclipsei totale de Soare

*Fig. 8.25.* Eclipsă totală de Soare

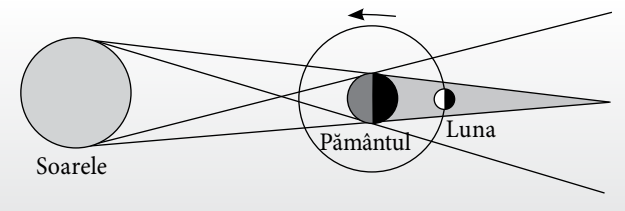



*Fig. 8.26.* Schema eclipsei totale de Lună

În zonele de penumbră (B şi C în *fig. 8.24*) Luna acoperă doar o parte din discul solar şi de pe Pământ se observă o *eclipsă parţială* de Soare.

Dacă Luna în faza de lună nouă este în apogeul orbitei sale (la distanţa maximă de Pământ), iar Pământul – în periheliu (la distanţa minimă de Soare), atunci în timpul eclipsei discul lunar nu va acoperi în întregime discul Soarelui şi se va produce o *eclipsă inelară* de Soare.

Pe an pot avea loc 2-5 eclipse de Soare. În unul şi acelaşi loc eclipsa totală poate avea loc o dată la circa 300 de ani.

Eclipsele totale de Soare oferă astronomilor oportunitatea de a observa şi cerceta coroana solară, adică partea exterioară a atmosferei solare. Printre astronomii care şi-au consacrat activitatea cercetării eclipselor solare se numără şi astronomii basarabeni Nicolae Donici şi Alexandru Deutsch.

În prezent, astronomii pot să creeze artificial o eclipsă totală de Soare cu ajutorul unui instrument numit *coronograf* (inventat în 1930 de Bernard Lyot).

• **Eclipsele de Lună.** Atunci când Luna în faza de lună plină uneori intră în conul de umbră al Pământului, se produce o eclipsă de Lună (*fig. 8.26*).

Eclipsele de Lună pot fi totale şi parţiale. Umbra Pământului în spaţiu are forma unui con convergent, care la distanţa medie Pământ–Lună are în secţiune diametrul de 2,5 ori mai mare decât diametrul Lunii. De aceea eclipsele de Lună au durata destul de lungă. Astfel, dacă Luna în faza de lună plină se află în perigeul orbitei sale, iar Pământul este în afeliu, eclipsa totală de Lună va avea durata maximă de circa 1 oră 45 min. În timpul eclipsei totale discul lunar nu dispare de pe cer, ci capătă o culoare roşiatică (*fig. 8.27*). Acest fenomen se explică prin faptul că razele albastre ale Soarelui sunt împrăştiate în atmosfera Pământului mai mult decât razele roşii care se refractă şi pătrund în conul de umbră, luminând suprafaţa Lunii.

În cazul când Luna intră numai parţial în conul de umbră al Pământului, se observă o *eclipsă parţială* de Lună.

Eclipsele de Lună sunt vizibile de pe toată emisfera Pământului, unde la momentul eclipsei Luna este deasupra orizontului. În timp de un an pot fi observate până la 3 eclipse de Lună. Încă în Antichitate s-a observat că eclipsele se repetă după 223 de luni sinodice sau 18 ani, 11 zile și 7 ore, perioadă numită **saros**, în decursul căreia au loc 71 de eclipse, inclusiv 43 de eclipse de Soare și 28 de eclipse de Lună. Sarosul permite prezicerea aproximativă a eclipselor.

*Fig. 8.27.* Eclipsă totală de Lună (foto I. Nacu)

## Verificați-vă cunoștințele

1. Ar putea fi observată la Polul Nord o eclipsă de Soare/ o eclipsă de Lună la data de 15 iunie? la 15 decembrie? Argumentaţi.
2. Diametrul unghiular al Soarelui este de circa 0,5° și e aproximativ egal cu cel al Lunii. Distanța medie de la Pământ la Lună este de 384 400 km, iar la Soare de 149 600 000 km. Calculaţi de câte ori diametrul liniar al Soarelui e mai mare decât cel al Lunii.
3. Enumeraţi factorii care determină durata eclipselor de Soare și de Lună.
4. În ce condiţii se poate produce o eclipsă inelară de Soare?
5. În ce direcţie se deplasează umbra Lunii pe suprafaţa terestră în timpul eclipselor de Soare?
6. Determinaţi durata unei eclipse de Soare observate de pe Lună.
7. De ce se interzice categoric observarea eclipselor de Soare direct prin telescop sau binoclu? Ce mijloace de protecţie a ochilor trebuie utilizate?
8. În care din fazele Lunii se pot observa cel mai bine prin telescop craterele și alte formaţiuni de pe suprafaţa ei? Argumentaţi.
9. În ce fază e văzut Pământul de pe Lună, atunci când pe Pământ Luna este în faza de lună nouă?
10. De pe care planete ar putea fi observată partea invizibilă a Lunii? Argumentaţi.
11. Explicaţi culoarea roșiatică a discului lunar în timpul eclipsei totale de Lună.

## f. Timpul și măsurarea lui. Calendarul

Măsurarea timpului în astronomie este bazată pe observaţii efectuate asupra unor mișcări periodice: rotaţia Pământului în jurul axei sale, mișcarea de revoluţie a Pământului în jurul Soarelui și a Lunii în jurul Pământului.

• **Timpul solar mijlociu.** În astronomie și în viaţa cotidiană se folosește așa-numitul *timp solar mijlociu*.

**Unitatea de timp solar mijlociu este *ziua solară mijlocie*, care constituie intervalul de timp dintre două culminaţii consecutive inferioare ale soarelui ecuatorial mijlociu pe unul și același meridian geografic.**

Ziua solară mijlocie începe la miezul nopţii mijlociu și este constantă pe parcursul anului.

Timpul solar mijlociu se notează cu $T_m$ și este definit ca timpul măsurat de la momentul culminaţiei inferioare a așa-numitului soare ecuatorial mijlociu până la orice alt moment, exprimat în fracţiuni de zi solară mijlocie.

Pe meridianul dat, timpul solar mijlociu $T_m$ este egal cu unghiul orar al soarelui mijlociu, $t_m$, plus $12^h$, adică

$$T_m = t_m + 12^h.$$

**E BINE SĂ MAI ȘTIȚI**

*Soarele mijlociu ecuatorial* este un punct fictiv ce se mișcă uniform pe ecuatorul ceresc, nu pe ecliptică, și a cărui poziţie se calculează pe cale teoretică pentru orice moment de timp. Această noţiune a fost introdusă pentru a avea drept unitate de timp o zi solară constantă, deoarece ziua solară adevărată este variabilă.

La amiază, unghiul orar al Soarelui $t_m = 0^h$ și deci timpul solar mijlociu $T_m = 12^h$.

• **Timpul local** și **timpul universal.** Timpul măsurat pe meridianul geografic dat este numit *timp local* (*civil*).

**Timpul solar mijlociu local al meridianului Greenwich (iniţial) este numit *timp universal*, $T_0$.**

Timpul local pe meridianul dat se poate exprima prin timpul universal și longitudinea geografică a locului:

$$T_\lambda = T_0 \pm \lambda,$$

unde „+” se ia pentru longitudinea estică și „–” pentru longitudinea vestică.

În calendarele și anuarele astronomice momentul producerii evenimentelor astronomice este indicat în timp universal.

• **Timpul fusului orar (legal).** Utilizarea în viaţa cotidiană a timpului local ar fi foarte incomodă, pentru că el variază continuu de la un meridian la altul. De aceea în anul 1884 a fost propus un nou sistem de calcul al timpului având la bază aşa-numitele *fuse orare*.

**APLICAŢII**

**Determinarea longitudinii geografice.** Diferenţa dintre timpurile locale pe două meridiane, în unul şi acelaşi moment, este egală cu diferenţa longitudinilor geografice ale meridianelor respective, exprimată în unităţi de timp. De exemplu, dacă meridianele 1 şi 2 au longitudinile $\lambda_1$ şi $\lambda_2$, atunci diferenţa de timp solar mijlociu pe ele este:

$$T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2.$$

Această relaţie se poate folosi la determinarea longitudinii geografice a locului dat.

*Fig. 8.28.* Calendarul solar Maya

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

*Calendarul iulian (stilul vechi).* În anul 46 î.Hr., împăratul Iulius Caesar a realizat reforma calendarului roman. Durata medie a anului a fost stabilită de 365 de zile şi 6 ore, adică foarte aproape de durata anului tropic. Pentru ca anul să aibă un număr întreg de zile, trei ani la rând erau consideraţi comuni, cu câte 365 de zile, iar al patrulea – bisect, cu 366 de zile. Anul este bisect dacă numărul care-l exprimă este divizibil exact cu 4. Prima lună din an era ianuarie. Acest calendar poartă numele de *calendar iulian* sau *stil vechi*. El a servit ca bază pentru calculele cronologice.
Anul iulian este cu 11 minute şi 13,9 secunde mai lung decât anul tropic. Ca urmare, la fiecare 128 de ani şi 68 de zile se acumulează o eroare de o zi. De aceea în secolul XVI eroarea calendarului iulian atinsese 10 zile. Acest fapt introducea o confuzie în aplicarea regulii de determinare a datei Paştelui, stabilite de Conciliul I ecumenic de la Niceea (a. 325 d.Hr.): Paştele creştin se sărbătoreşte în prima duminică după prima lună plină care are loc după ziua echinocţiului de primăvară, 21 martie. Aşadar, în secolul XVI reforma calendarului iulian devenise o problemă foarte actuală.

Globul pământesc este împărţit în 24 de fuse orare cu lăţimea de 15° (sau $1^h$) fiecare, numerotate de la 0 la 23. Meridianul de bază (central) al fusului zero este meridianul Greenwich.

**Timpul local al meridianului de bază al fusului orar cu numărul de ordine *n* este numit *timp al fusului orar* sau timp *legal*, $T_n$, şi este aplicat în limitele întregului fus orar considerat.**

Relaţia dintre timpul legal şi timpul universal este $T_n = T_0 + n^h$ („+" – la est şi „–" – la vest de Greenwich). Oraşul Chişinău, având longitudinea $\lambda = 28°49'$, se află în fusul orar $n = 2$, deci pentru Chişinău relaţia dintre timpul legal şi timpul universal este

$$T_2 = T_0 + 2^h.$$

Pentru a economisi energia electrică şi a utiliza la maximum lumina zilei, se introduce aşa-numita **oră de vară**: în ultima duminică a lunii martie ácele ceasornicului se mută cu o oră înainte. Timpul de vară (sau oficial) este egal cu timpul legal plus o oră:

$$T_v = T_n + 1^h.$$

Pentru Chişinău $T_v = T_2 + 1^h = T_0 + 3^h$, adică vara diferenţa dintre ora Chişinăului şi timpul universal este de 3 ore. Ora de vară se anulează în ultima duminică a lunii octombrie.

La mijlocul secolului al XX-lea a fost introdusă scara strict uniformă de **timp atomic internaţional**. Ea se bazează pe un proces periodic natural de înaltă precizie – tranziţia de rezonanţă a atomului de ceziu între două niveluri energetice – şi nu depinde de rotaţia Pământului. Drept unitate de timp se ia *secunda atomică* folosită în SI (Sistemul Internaţional).

• **Calendarul.** Sistemul de calcul al intervalelor mari de timp este numit **calendar**.

De-a lungul istoriei au fost întocmite şi utilizate calendare care pot fi grupate în trei tipuri: **solare**, **lunare** şi **luni-solare**. Unul dintre cele mai exacte calendare solare antice este considerat Calendarul Maya (*fig 8.28*).

La baza calendarului solar se află durata anului tropic egală cu 365 de zile 5 ore 48 min. 46,1 s, iar la baza calendarului lunar – luna sinodică egală cu 29,5 zile. Calendarul luni-solar este bazat pe ambele aceste perioade.

La întocmirea unui calendar se urmăreşte ca anul calendaristic să fie cât mai aproape de durata anului tropic şi să conţină un număr întreg de zile solare.

• **Calendarul gregorian (stilul nou).** În anul 1582, Papa Gregorius al XIII-lea a dispus reforma calendarului iulian. În noul calendar a fost păstrată succesiunea anilor comuni de 365 de zile și a anilor bisecți de 366 de zile din calendarul iulian, însă pentru a reduce diferența dintre anul iulian și durata anului tropic, a fost modificată regula de stabilire a anilor bisecți cu referire la anii care exprimă secole. Anii seculari sunt considerați bisecți numai dacă numărul care îi exprimă este divizibil exact cu 400. Astfel, anii 1700, 1800, 1900, 2100 devin comuni, în timp ce anii 2000, 2400, 2800 sunt bisecți. În anul bisect luna februarie are 29 de zile.

Eroarea calendarului gregorian este de doar 26 de secunde pe an, astfel că eroarea de o zi se acumulează aproximativ la 3300 de ani. Noul sistem calendaristic a căpătat denumirea de *calendar gregorian* sau *stil nou*. Către începutul secolului al XX-lea, diferența dintre stilul nou (gregorian) și cel vechi (iulian) a atins 13 zile și va rămâne așa până în anul 2100.

În prezent, calendarul gregorian este adoptat de majoritatea țărilor lumii. Stilul vechi mai continuă să fie folosit doar în unele țări de biserica creștină ortodoxă. În legătură cu intensificarea relațiilor dintre state, calendarul gregorian este astăzi utilizat în toate țările, uneori paralel cu calendarele tradiționale.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Pentru a determina coordonatele navei, căpitanul a măsurat în ziua de 22 decembrie distanța zenitală a Soarelui la amiaza adevărată, obținând valoarea de $66^{\circ}34'$. La momentul observației orologiul de timp universal (Greenwich) indica ora $10^{h}54^{m}$. Determinați coordonatele geografice ale navei.
2. Ce dată după stilul vechi este la 1 martie 2011?
3. O aeronavă A340 are de parcurs distanța de 6 400 km de la Philadelphia (SUA) la Frankfurt pe Main (Germania) cu viteza de 750 km/h, diferența de fus orar fiind $6^{h}$. Când va sosi aeronava la Frankfurt, dacă ea a decolat de la Philadelphia în ziua de 3 august la ora $20^{h}00^{m}$?
4. Va fi anul 2200 un an bisect după stilul nou? Dar după stilul vechi?

## 8.3. SISTEMUL SOLAR

### a. Planetele de tip terestru și planetele gigante. Sateliții planetelor. Planetele pitice

***Caracteristici generale.*** Soarele și toate corpurile care se mișcă în jurul lui – planetele cu sateliții lor, asteroizii, cometele, precum și materia interplanetară, formează Sistemul Solar (*fig. VI*, planșa color, p. 162).

Aproape întreaga masă a Sistemului Solar (99,87%) este concentrată în Soare. Ca mărime, Soarele este de 109 ori mai mare în diametru și aproximativ de 333 000 de ori mai masiv decât Pământul. În jurul Soarelui orbitează următoarele planete (în ordinea creșterii distanței de la Soare): Mercur, Venus, Pământ, Marte, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun (vezi *tab. 1*, p. 157). Orbitele planetelor sunt situate aproximativ în același plan cu orbita Pământului.

Între orbitele planetelor Marte și Jupiter, în jurul Soarelui gravitează asteroizii, formând așa-numita *centură principală a asteroizilor.*

Centura asteroizilor separă sistemul planetar în două grupuri: **planetele terestre** sau **telurice**, de tipul Pământului (Mercur, Venus, Pământ și Marte), în interiorul centurii, și **planetele gigante gazoase** sau **joviene** (Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun), în afara orbitelor asteroizilor.

Planetele telurice sunt asemănătoare între ele, fiind relativ mici, cu diametrul sub 13 000 km. Ele au suprafața solidă și densitatea medie cuprinsă între 3,9 și 5,5 $g/cm^3$. Aceste planete se caracterizează prin rotație axială lentă, număr mic de sateliți naturali (Pământul cu Luna și Marte cu sateliții săi Phobos și Deimos). Planetele terestre sunt compuse, în principal, din rocă și metal.

Planetele gigante se caracterizează prin dimensiuni mari (diametre de peste 48 000 km), densitate mică (0,7–1,8 $g/cm^3$), rotație axială rapidă, lipsa suprafeței solide, atmosferă densă și extinsă, bogată în hidrogen și heliu. Aceste planete au mulți sateliți și inele de praf și gaz.

În jurul Soarelui mai gravitează cometele și nenumărate corpuri *meteorice*, de la mărimea unui firicel de nisip până la câțiva kilometri. Asteroizii,

corpurile meteorice și cometele fac parte din categoria **corpurilor mici** ale Sistemului Solar. Spațiul dintre planete este ocupat de gaz și praf cosmic extrem de rarefiat.

*Fig. 8.29.* Suprafața planetei Mercur

*Fig. 8.30.* Planeta Venus

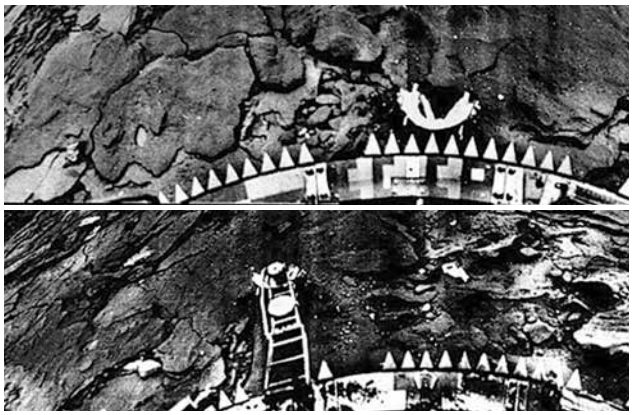


*Fig. 8.31.* Imagine a suprafeței planetei Venus (stația „Venera-14", a. 1981)

### Planeta Mercur

Mercur este planeta cea mai apropiată de Soare. Această planetă nu are sateliți. Având raza de 2 439 km, este doar cu puțin mai mare decât Luna. Densitatea medie a planetei este aproape ca a Pământului. Axa de rotație este practic perpendiculară pe planul orbitei sale și de aceea pe Mercur nu există anotimpuri. Perioada de revoluție – anul mercurian – este de circa 88 de zile terestre, iar perioada de rotație în jurul axei este de 58,6 zile terestre.

Mercur are câmp magnetic propriu, însă acesta este de 300 de ori mai slab decât cel al Pământului. Planeta Mercur poate fi văzută timp de cel mult o oră, aproape de orizont, fie seara la vest după apusul Soarelui, fie dimineața la est înainte de răsăritul Soarelui.

Suprafața planetei Mercur (*fig. 8.29*) este foarte asemănătoare cu suprafața Lunii. La fel ca și Luna, ea este acoperită de cratere de diferite dimensiuni. Planeta este practic lipsită de atmosferă. Pe suprafața ei la ecuator temperatura atinge ziua circa 700 K, iar pe partea nocturnă scade până la 100 K. Aceste condiții fac imposibilă existența vieții pe Mercur.

### Planeta Venus

Venus (cunoscută sub denumirea populară de *Luceafăr*) (*fig. 8.30*) este a doua planetă de la Soare. Planeta Venus nu are sateliți. Ea poate fi văzută pe cer ca o stea strălucitoare dimineața înainte de răsăritul Soarelui ori seara după apusul Soarelui. Venus prezintă faze la fel ca și Luna.

În ceea ce privește masa, raza și alte caracteristici, Venus nu se deosebește mult de Pământ. Venus, ca și Pământul, are atmosferă densă. Totuși, condițiile fizice pe suprafața acesteia diferă în mod radical de cele de pe Pământ.

Date despre suprafața planetei au fost obținute cu ajutorul stațiilor automate care au coborât pe solul venusian (*fig. 8.31*). Aici au fost descoperite circa 1 000 de cratere, lanțuri de munți și văi asemănătoare cu cele de pe Pământ.

Măsurările directe efectuate de stațiile „Venera" și „Mariner-2" au demonstrat că în atmosfera venusiană predomină dioxidul de carbon. Datele transmise de aceste aparate cosmice au arătat că temperatura medie la suprafața planetei atinge circa 460 °C, iar presiunea este de 90 atm. Temperatura înaltă de la suprafață este rezultatul *efectului de seră* provocat de dioxidul de carbon din atmosferă.

Anul venusian s-a dovedit a fi egal cu circa 225 de zile terestre, iar perioada de rotație în jurul axei pro-

prii – cu aproximativ 243 de zile terestre, adică mai lungă decât cea de revoluție. S-a constatat că rotația axială a planetei Venus este retrogradă, adică are loc în sens opus mișcării ei orbitale. Axa de rotație este aproape perpendiculară pe planul orbitei și de aceea pe planetă nu are loc succesiunea anotimpurilor.

Planeta Venus totdeauna este acoperită cu un strat gros de nori, care nu permit observarea directă a suprafeței ei prin telescopul optic. De aceea perioada și sensul rotației axiale ale lui Venus au fost determinate prin metode radar.

Măsurările magnetometrice au arătat că Venus nu are câmp magnetic propriu. Din cauza temperaturii și presiunii extrem de înalte, viața sub orice formă pe planeta Venus e prea puțin probabilă.

*Fig. 8.32.* Satelitul Phobos al planetei Marte

### Planeta Marte

Marte este a patra planetă de la Soare și gravitează în jurul acestuia la o distanță de 1,52 ori mai mare decât Pământul. Planeta este de două ori mai mică în diametru și de nouă ori mai puțin masivă decât Pământul (*fig. VII*, planșa color, p. 162). Densitatea medie a planetei este de $3{,}9 \cdot 10^3$ kg/m$^3$. Planul ecuatorului este înclinat cu aproape același unghi față de planul orbitei, ca și la Pământ. Aceasta înseamnă că pe Marte are loc succesiunea anotimpurilor. Perioada de revoluție în jurul Soarelui este de 1,88 de ani.

Cercetările arată că Marte are un câmp magnetic propriu foarte slab.

Prin telescop pe suprafața planetei se pot vedea regiuni luminoase de culoare portocalie-roșiatică, numite *continente,* regiuni întunecate sub formă de pete numite *mări,* precum și pete albe care se formează la poli, numite *calote polare*. Acestea reprezintă un condensat de $CO_2$ cu mici cantități de gheață de $H_2O$. Ele se formează toamna și dispar la începutul verii. Unele regiuni reprezintă albii de râuri secate, o dovadă că miliarde de ani în urmă planeta Marte a avut, probabil, o atmosferă mai densă și apă lichidă.

În condițiile existente azi, atmosfera planetei este extrem de rarefiată și de aceea prezența apei pe suprafața marțiană este imposibilă. Componentele predominante ale atmosferei sunt dioxidul de carbon și azotul. Presiunea atmosferică la suprafață este de 160 de ori mai joasă ca pe Pământ. Temperatura medie a suprafeței este de circa –70 °C.

*Fig. 8.33.* Aparat robotizat marțian de teren (NASA, 2003)

Marte are doi sateliți, Phobos și Deimos, descoperiți în 1877. Sateliții au forma neregulată și se aseamănă mai mult cu doi asteroizi. Phobos are mărimea de 22–25 km (*fig. 8.32*), iar Deimos – de circa 13 km.

Începând cu anul 1960, spre Marte au fost lansate zeci de aparate cosmice (*fig. 8.33*). Aceste misiuni au avut drept scop colectarea de date despre suprafața și condițiile fizice de pe Marte (*fig. VIII*, planșa color, p. 163). Rezultatele cercetării planetei ar putea să contribuie la elucidarea originii și a evoluției Pământului.

### Planeta Jupiter

Jupiter este cea mai mare planetă din Sistemul Solar. Masa acestei planete gigantice este de 2 ori mai mare decât masa totală a tuturor celorlalte planete (*fig. IX*, planșa color, p. 163).

Jupiter are perioada mică de $9^h\,55^m\,40^s$ și deci viteză mare de rotație axială. Rotația rapidă face ca planeta să fie puternic turtită la poli.

Axa de rotație fiind aproape perpendiculară pe planul orbitei, pe Jupiter practic nu are loc succesiunea anotimpurilor.

Jupiter este aproximativ de cinci ori mai departe de Soare decât Pământul, de aceea primește de 27 de ori mai puțină căldură decât planeta noastră. Temperatura pe suprafața aparentă a planetei este de –145 °C.

Este de menționat că Jupiter are un câmp magnetic de 50 de ori mai intens decât cel al Pământului.

Jupiter este o planetă gazoasă. Densitatea medie a planetei este puțin mai mare decât densitatea apei. Din observații s-a stabilit că atmosfera planetei se compune predominant din hidrogen molecular și heliu.

În atmosferă s-au pus în evidență benzi roșiatice întunecate de nori, paralele cu ecuatorul, și pete de diferite dimensiuni, printre care este și renumita *pată roșie*, ale cărei dimensiuni depășesc diametrul Pământului. Ea pare a fi un vârtej enorm și stabil în atmosferă.

În jurul lui Jupiter orbitează 62 de sateliți cunoscuți (2004), dintre care patru cei mai mari, numiți și *sateliți galileeni* – Io, Europa, Ganymede și Callisto, au fost descoperiți în 1610 de Galileo Galilei (*fig. X*, planșa color, p. 163). Ceilalți sateliți sunt mult mai mici.

### Planeta Saturn

Saturn este a doua planetă ca mărime în Sistemul Solar. Ea are masa de 95 de ori mai mare decât a Pământului. Densitatea medie a planetei este mai mică decât cea a apei. Datorită rotației axiale rapide, Saturn este turtit la poli chiar mai puternic decât Jupiter. Ca și pe Jupiter, diverse zone ale planetei au viteze de rotație diferite, din care cauză perioada de rotație crește de la ecuator spre poli (*fig. XI*, planșa color, p. 163).

Saturn este aproximativ de două ori mai departe de Soare decât Jupiter, de aceea temperatura la suprafața atmosferei este de circa –170 °C. Atmosfera este formată din hidrogen și metan, dar, spre deosebire de Jupiter, nu conține amoniac.

O particularitate caracteristică a planetei Saturn o constituie inelele sale, observate pentru prima dată de Galileo Galilei. S-a constatat că inelele se rotesc în planul ecuatorului și sunt despărțite prin intervale întunecate numite „diviziuni" (Cassini, Encke etc.). Inelele au lățimea de zeci de mii de kilometri, iar grosimea de la 2 până la ~20 km. Acestea sunt alcătuite dintr-un număr enorm de particule solide, praf și gaze.

Până în prezent, în jurul lui Saturn au fost descoperiți 62 de sateliți. Cel mai mare satelit este Titan, al doilea ca mărime în Sistemul Solar după satelitul Ganymede al lui Jupiter. El are diametrul mai mare decât cel al planetei Mercur.

Titan este unicul satelit în Sistemul Solar care are o atmosferă foarte densă, constituită preponderent din azot și hidrocarburi (metan, etan etc.). Date extrem de prețioase despre Titan a furnizat nava spațială „Cassini", lansată în 1997 cu sonda „Huygens" (pron. höihəns) la bord. În 2005, aparatul Huygens a atins suprafața lui Titan și a transmis primele imagini ale suprafeței (*fig. 8.34*), precum și date despre temperatură, presiune, compoziția atmosferei.

*Fig. 8.34.* Suprafața satelitului Titan (NASA/ESA, a. 2005)

### Planeta Uranus

Planeta Uranus a fost descoperită în 1781 de astronomul englez William Herschel. Ea este la limita vizibilității cu ochiul liber și poate fi observată

numai prin telescop unde apare ca un mic disc verzui (*fig. XII*, planșa color, p. 163). Uranus are perioada de revoluție de 84 de ani. Masa planetei este de 14,6 ori mai mare decât masa Pământului. Ca și celelalte planete gazoase, Uranus se deosebește prin rotația sa rapidă în jurul axei, cu perioada de $10^h49^m$. Planul ecuatorului este înclinat cu $98^o$ față de planul eclipticei, din care cauză Uranus are sensul retrograd de rotație și produce impresia că se rostogolește pe orbita sa.

Datele demonstrează că în compoziția atmosferei planetei predomină hidrogenul. Temperatura la suprafața vizibilă a norilor este de circa 55 K.

Planeta Uranus are un sistem de inele subțiri.

În jurul lui Uranus gravitează 27 de sateliți cunoscuți, ale căror orbite se situează în planul ecuatorului planetei și deci sunt practic perpendiculare pe planul orbitei sale. Cel mai mare satelit este Titania, cu diametrul aproximativ de două ori mai mic decât al Lunii.

### Planeta Neptun

Planeta Neptun a fost descoperită pe cale teoretică de către Le Verrier și Adams și observată pe cer, în 1846, de astronomul german Galle. Ea poate fi văzută numai prin telescop. Masa ei este egală cu 17,2 mase terestre. Perioada de revoluție a planetei este de aproape 165 de ani. Perioada de rotație axială este de $16^h6^m$. Neptun are structura internă și atmosfera foarte asemănătoare cu ale lui Uranus. Densitatea medie a lui Neptun este de 1,7 g/cm$^3$.

Atmosfera lui Neptun este alcătuită din hidrogen, heliu și metan. Metanul absoarbe intens razele de culoare roșie și galbenă, de aici și culoarea albăstruie a planetei.

Pe planetă a fost identificată o pată neagră (*fig. XIII*, planșa color, p. 163), asemănătoare cu pata roșie de pe Jupiter, care peste un timp a dispărut. Se presupune că sub învelișul atmosferic ar putea să existe gheață și cel mai mare ocean din Sistemul Solar.

Câmpul magnetic este ceva mai intens ca al Pământului.

Neptun are 13 sateliți cunoscuți. Cel mai mare dintre ei, Triton, descoperit în 1846, depășește după mărime planeta pitică Pluto. Neptun, de asemenea, are un sistem de inele de gaz și praf.

În 2006 a fost adoptată o nouă clasificare a planetelor și introdusă categoria **planetelor pitice**. Din acestea fac parte: Pluto, Haumeea, Makemake, Eris și asteroidul Ceres (vezi *tab. 2*, p. 157).

**E BINE SĂ MAI ȘTIȚI**

- În anul 1986, nava spațială „Voyager-2" a transmis imagini ale planetei Uranus, sateliților și inelelor ei. Câmpul magnetic al lui Uranus este ceva mai slab decât al Pământului.
- Aproape toate cunoștințele noastre despre planeta Neptun se bazează pe datele furnizate de sonda spațială „Voyager-2" în 1989.

**Verificați-vă cunoștințele**

1. Unde trebuie căutate pe cer planetele Mercur și Venus?
2. Cât timp și la ce înălțime maximă pot fi observate pe cer planetele Mercur și Venus la Chișinău?
3. Explicați succesiunea fazelor planetei Venus.
4. Care sunt consecințele efectului de seră pe planeta Venus?
5. Ce reprezintă renumita „pată roșie" de pe Jupiter?
6. Descrieți și explicați ce reprezintă inelele planetei Saturn.
7. Care este particularitatea mișcării de rotație a planetei Uranus?
8. Descrieți cum a fost descoperită planeta Neptun.

## b. Corpurile mici ale Sistemului Solar

• **Asteroizii.** În decursul secolului XIX au fost descoperite numeroase corpuri cerești de dimensiuni mici, denumite *asteroizi* sau *planete minore*. În prezent se cunosc cca 18 000 de asteroizi catalogați, inclusiv peste 3 000 de asteroizi cu dimensiuni mai mari de 0,5 km.

Majoritatea asteroizilor sunt concentrați între orbitele planetelor Marte și Jupiter, formând **centura principală a asteroizilor** (*fig. 8.35*). Există și asteroizi

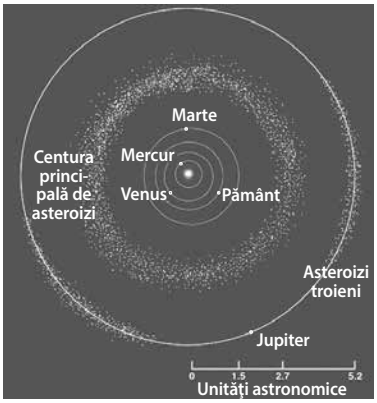



*Fig. 8.35.* Centura asteroizilor

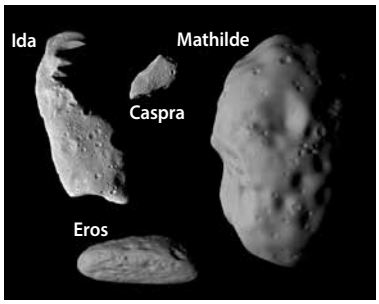



*Fig. 8.36.* Asteroizi

ale căror orbite se extind dincolo de centura asteroizilor. De exemplu, asteroidul Icarus la periheliu este mai aproape de Soare decât Mercur.

Asteroizii apar pe cer ca niște stele slabe ce se deplasează foarte lent pe bolta cerească, descriind bucle aparente, asemenea planetelor superioare. Masa totală a asteroizilor cunoscuți este $\approx 4 \cdot 10^{21}$ kg sau de aproximativ 20 de ori mai mică decât masa Lunii și împreună ar forma o planetă cu diametrul de numai circa 1 500 km.

Asteroizii au formă neregulată (cu excepția lui Ceres) și sunt lipsiți de atmosferă. Forma neregulată a asteroizilor ar putea însemna că ei reprezintă fragmente rezultate în urma unor coliziuni (*fig. 8.36*).

Asteroizilor li se atribuie nume proprii din mitologia greco-romană, dar și nume de personalități marcante, denumiri geografice etc. De exemplu, există asteroidul „Moldova" având magnitudinea aparentă de $16{,}5^m$, asteroizii „Transilvania", „Danubia", „Eminescu", „Donici" ș.a. Astronomul Alexandru Deutsch, activând la Observatorul Pulkovo din St.-Petersburg (Rusia), a descoperit asteroidul „Reni".

• **Cometele.** Aceste corpuri mici ale Sistemului Solar reprezintă un amestec de gheață (apă și gaze înghețate), particule de rocă și praf care din anumite cauze nu au fost înglobate în planete atunci când s-a format Sistemul Solar.

Cometele devin vizibile doar atunci când se apropie de Soare. În această perioadă ele sunt active și prezintă o anumită structură cu următoarele părți distincte: nucleul, coma, coada (*fig. 8.37*).

**Nucleul** solid, relativ stabil, cu dimensiuni de la câteva sute de metri la câteva zeci de kilometri, este alcătuit preponderent din gheață de metan, amoniac, apă, cian, dioxid de carbon, azot, cu o mică cantitate de praf și fragmente de rocă.

**Coma** reprezintă un nor rarefiat în jurul nucleului, constituit din vapori de apă, dioxid de carbon și alte gaze neutre, sublimate din nucleu.

**Coada de praf**, de până la 10 milioane de kilometri lungime, este formată din particule de praf ejectate din nucleu.

**E BINE SĂ MAI ȘTIȚI**

Mișcarea cometelor a fost explicată pentru prima dată în anul 1705 de astronomul englez Edmond Halley care a descoperit, de asemenea, cometa ce îi poartă numele, cu perioada de 76 de ani (*fig. 8.38*). Ultima trecere a cometei Halley la periheliu a avut loc în 1986, când ea a fost cercetată cu ajutorul unor aparate cosmice automate. Data viitoare această cometă va putea fi observată în anul 2061.

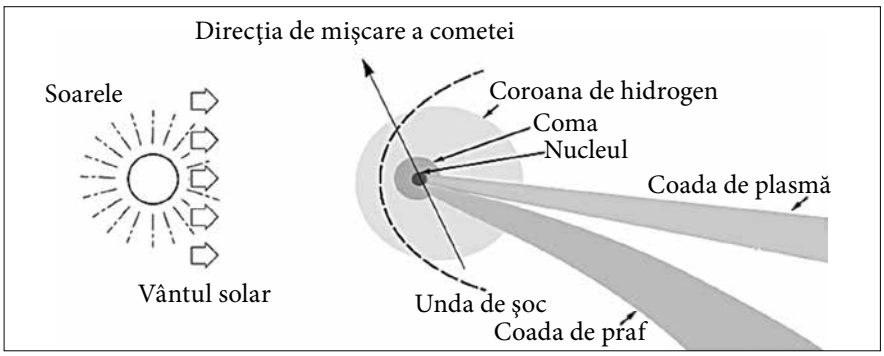



*Fig. 8.37.* Structura cometei

*Fig. 8.38.* Cometa Halley, a. 1986

**Coada de plasmă (de ioni)**, de câteva sute de milioane de kilometri lungime, este formată din plasmă sub formă de raze și jeturi generate de interacțiunea cu vântul solar.

Datorită presiunii luminii și vântului solar, coada cometei este orientată totdeauna în direcție opusă Soarelui. Coada poate avea diferite

forme în funcţie de raportul dintre forţele de gravitaţie solară, orientate spre Soare, și forţele de presiune ale luminii și vântului solar, orientate în direcţie opusă Soarelui.

Majoritatea cometelor se mișcă pe orbite eliptice extrem de întinse sau parabolice. Perioadele de revoluţie ale acestor comete în jurul Soarelui se presupune că ar atinge milioane de ani. Mai puţin numeroase sunt cometele cu orbite eliptice și perioade mai mici de 200 de ani numite **scurtperiodice**.

Un grup numeros de comete scurtperiodice cu perioada de 3-10 ani, cunoscut sub denumirea de „familia lui Jupiter", se depărtează de Soare în afeliu până la orbita lui Jupiter.

Având în vedere masa extrem de mică a cometelor în comparaţie cu masa Pământului, ele nu prezintă un pericol prea mare pentru planeta noastră. În anul 1910, Pământul a trecut prin coada cometei Halley. Cu toate acestea, la suprafaţa Pământului nu s-au înregistrat urme de gaze nocive – oxid de carbon și cian, prezente în coada cometei. Altă situaţie ar crea ciocnirea Pământului cu nucleul unei comete care ar provoca o explozie grandioasă și o undă de șoc distrugătoare ce ar produce mari dezastre. Se presupune că un eveniment similar, cunoscut ca „fenomenul Tunguska", ar fi avut loc în 1908 în Siberia Centrală, când unda de șoc, generată de explozia unui corp neidentificat, a produs „culcarea" arborilor din taiga pe o rază de 30 km.

• **Obiectele transneptuniene.** Corpurile mici și îndepărtate care gravitează în jurul Soarelui dincolo de orbita planetei Neptun sunt numite **obiecte transneptuniene** (*fig. 8.39*). O parte din ele au fost descoperite abia recent. Primul corp transneptunian, planeta pitică Pluto, a fost identificat în 1930.

Începând din 1992, au fost descoperite aproape o mie de obiecte transneptuniene. Unele din acestea au nume proprii, cum ar fi Ixion, Varuna, Quaoar, Eris, Sedna ș.a.

Observarea obiectelor transneptuniene a devenit posibilă datorită utilizării telescoapelor spaţiale, precum și a celor mai performante telescoape terestre.

• **Centura Kuiper.** În zona influenţei gravitaţionale a lui Neptun, cuprinsă între 30 și 50 UA de la Soare, se află așa-numita *Centură Kuiper*, formată din obiecte pe orbite aproape circulare situate aproape de planul Sistemului Solar. În prezent se cunosc circa 10 000 de obiecte, ce reprezintă corpuri înghe-

ţate mai mari de 50 km aparţinând Centurii Kuiper. Printre acestea sunt Varuna, având circa 500 km în diametru, descoperită în anul 2000, Quaoar de circa 1 250 km (a. 2002), Sedna – 1 700 km (a. 2003) ș.a.

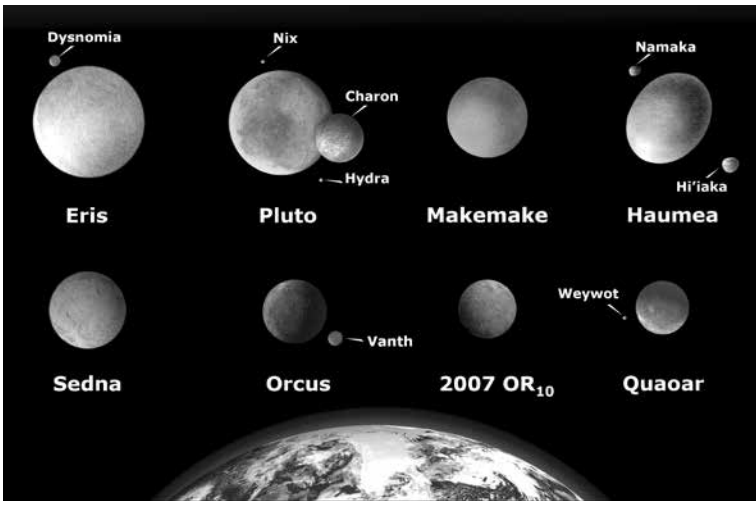



*Fig. 8.39.* Obiecte transneptuniene

**E BINE SĂ MAI ȘTIŢI**

• Ce consecinţe ar avea impactul unei comete cu Pământul? O cometă a cărei orbită este foarte aproape de Soare ar putea ori să lovească o planetă, ori să fie aruncată în afara Sistemului Solar. Un asemenea fenomen s-a produs în 1994 când nucleul cometei Shoemaker–Levy-9 s-a dezintegrat în zeci de fragmente care apoi s-au ciocnit cu Jupiter.

• Una dintre problemele care îi frământă mult pe astronomi este originea cometelor. Potrivit ipotezei emise de astronomul olandez Oort în 1950, Sistemul Solar este înconjurat de un nor sferic uriaș de nuclee cometare, cunoscut ca „norul lui Oort". Acesta conţine miliarde de nuclee și se întinde până la distanţe de circa 100–150 mii UA* de la Soare.

* 1 UA (unitate astronomică) = 149,6 mil. km – distanţa medie Pământ–Soare.

• Conform noilor definiţii adoptate de Uniunea Astronomică Internaţională în 2006, patru dintre obiectele transneptuniene – Pluto, Haumea, Makemake și Eris – sunt considerate planete pitice din categoria *plutoizilor*, deci ele nu fac parte din clasa corpurilor mici ale Sistemului Solar.

## Verificaţi-vă cunoștinţele

1. Pot fi observaţi asteroizii pe cer cu ochiul liber?
2. Cum se poate deosebi pe cer un asteroid de o stea?
3. Care este numărul aproximativ și masa totală a asteroizilor cunoscuţi astăzi?

## c. Pământul. Structura internă, hidrosfera, atmosfera și magnetosfera Pământului. Luna. Mareele

• **Pământul.** Încă în Antichitate babilonienii şi indienii, observând cum dispar treptat corăbiile la orizont, își dădeau seama că Pământul este convex. Mai târziu, ideea sfericităţii Pământului a fost susţinută şi de grecii antici în şcolile de filosofie ale lui Pitagora și Platon. Aristotel (384–322 î.Hr.) a fundamentat teoretic această idee folosind drept dovadă eclipsele de Lună, în timpul cărora pe discul lunar se vede marginea rotundă a umbrei Pământului.

Astăzi, imaginile fotografice, realizate cu ajutorul sateliţilor artificiali şi al navelor cosmice, arată clar că Pământul are forma aproape sferică și privit din cosmos prezintă faze asemănătoare cu cele ale Lunii. Raza ecuatorială a Pământului determinată cu ajutorul sateliţilor artificiali este egală cu 6 378,14 km.

• **Structura internă.** Pământul are o structură internă stratificată. El este format din crustă (scoarţă), manta și nucleu (*fig. XIV*, planșa color, p. 163).

**Crusta terestră** este stratul exterior solid al Pământului. Grosimea crustei variază de la 5 km în oceane la 30–50 km în partea continentală. Temperatura crustei crește rapid cu adâncimea, aproximativ cu 20 °C la kilometru. Astfel, la adâncimea de 10 km temperatura atinge 180 °C. Vârsta crustei terestre se estimează la aproximativ 4,5 miliarde de ani.

**Mantaua** constituie 67% din masa Pământului și circa 83% din volumul său. Ea reprezintă un înveliș în jurul nucleului, de la suprafaţa exterioară a nucleului până la partea inferioară a scoarţei, cu grosimea de 2 890 km.

**E BINE SĂ MAI ȘTIŢI**

Forma și dimensiunile Pământului au fost stabilite cu mare precizie, prin metoda *măsurărilor de grad* utilizată încă în secolul III î.Hr. de către matematicianul și astronomul antic grec Eratostene (cca 276–194 î.Hr.).
Eratostene știa că la Siena (acum localitatea Asuan, Egipt), situată mai la sud de Alexandria pe același meridian, la amiază Soarele este în zenit și luminează fundul celor mai adânci fântâni. În aceeași zi, la Alexandria distanța zenitală a Soarelui este egală aproximativ cu 7,2°. Știind distanța dintre Alexandria și Siena egală cu 5 000 de stadii egiptene, el a determinat raza Pământului. Lungimea stadiei egiptene nu se cunoaște astăzi cu precizie, de aceea nu poate fi apreciată exact valoarea razei obținute de Eratostene.

Mantaua superioară și crusta terestră formează învelișul superior solid al Pământului, numit **litosferă**. Grosimea medie a litosferei este de cca 100 km. Litosfera e fragmentată în platforme solide, numite plăci tectonice, care se deplasează independent una față de alta. În regiunea faliilor dintre plăci se pot produce cutremure de pământ și se intensifică activitatea vulcanică.

Se presupune că sursele de căldură din interiorul Pământului sunt concentrate în nucleu și determinate de dezintegrarea radioactivă a elementelor.

**Nucleul** este constituit dintr-un aliaj de fier și nichel cu impurităţi de alte elemente. Analiza propagării undelor seismice arată că Pământul are un nucleu interior solid, înconjurat de nucleul exterior fluid. *Nucleul interior* are raza de 1 225 km și densitatea de 12,5 g/cm$^3$. *Nucleul exterior* are grosimea de circa 2 245 km și densitatea de 1 000 kg/m$^3$. Materia din acest strat vâscos este un bun conductor electric.

• **Hidrosfera.** Oceanele acoperă 71% din suprafaţa Pământului și formează hidrosfera terestră. Pământul este unica planetă din Sistemul Solar care are hidrosferă. Ea influenţează considerabil clima de pe Pământ.

• **Atmosfera.** Pământul are o atmosferă stratificată pe verticală (*fig. 8.40*). Gazele componente ale atmosferei sunt azotul, $N_2$ (78%), oxigenul, $O_2$ (21%) și alte gaze în cantităţi foarte mici (dioxid de carbon, gaze inerte, hidrogen, ozon ș.a.), precum și vaporii de apă.

Atmosfera terestră are un rol extrem de important pentru existenţa vieţii pe Pământ, deoarece ne protejează de radiaţiile cosmice distrugătoare, de vântul solar format din protoni de înaltă energie, precum și de micrometeoriţi. Studiul atmosferei terestre ne permite să înţelegem mai bine proprietăţile atmosferelor de pe alte planete.

• **Câmpul magnetic și magnetosfera Pământului.** Conform concepţiilor actuale, câmpul magnetic terestru este generat de nucleul lichid și cel solid al Pământului în urma unor procese fizice complexe. Pământul, rotindu-se în jurul axei sale, antrenează în această mișcare și nucleul. Ca urmare, în nucleu ia naștere un curent electric circular care generează câmpul magnetic.

Câmpul magnetic al Pământului reprezintă un dipol, a cărui axă formează un unghi de 11° cu axa

de rotaţie şi nu trece prin centrul geometric de rotaţie al Pământului.

Câmpul geomagnetic protejează Pământul împotriva razelor cosmice – particule încărcate electric de înaltă energie (protoni şi nuclee de elemente grele) – care vin din spaţiul cosmic îndepărtat, precum şi împotriva vântului solar – particule încărcate, expulzate de Soare în timpul erupţiilor cromosferice.

Spaţiul ocupat de câmpul magnetic terestru este numit **magnetosferă** (*fig. 8.41*). Aceasta este puternic deformată în partea dinspre Soare din cauza vântului solar care o comprimă, reducând dimensiunile ei la circa 70 000 km. În partea opusă, adică nocturnă, magnetosfera este foarte alungită extinzându-se până la orbita Lunii. Frontiera dintre magnetosferă şi spaţiul cosmic este numită **magnetopauză**.

În urma cercetării spaţiului cosmic circumterestru cu ajutorul aparatelor cosmice s-a constatat că în magnetosferă există regiuni sub formă de inele ce înconjoară Pământul şi în care sunt concentrate fluxuri enorme de protoni şi electroni captaţi din vântul solar. Aceste regiuni au denumirea **centuri de radiaţie** ale Pământului (*fig. 8.41*).

Fluxul de particule din vântul solar care se mişcă cu viteze de 400–1 000 km/s, ajungând la Pământ, perturbează câmpul geomagnetic, provocând aşanumitele *furtuni magnetice*. Acestea dau naştere aurorelor polare şi pot deregla comunicaţiile radio în regiunile polare.

• **Luna.** Unicul satelit natural al Pământului, Luna, este şi cel mai strălucitor corp ceresc după Soare (*fig. 8.42*). Masa Lunii este de 81,3 ori mai mică decât cea a Pământului. Perioada de rotaţie a Lunii în jurul axei este de 27,3 zile fiind egală cu perioada de revoluţie a ei în jurul Pământului. Drept consecinţă, Luna este orientată mereu cu aceeaşi parte spre Pământ.

Luna nu are atmosferă. Lipsa atmosferei face ca temperatura pe Lună să varieze considerabil de la +130 °C ziua la –173 °C noaptea.

Pământul văzut de astronauţi pe cerul Lunii este un disc cu diametrul unghiular aparent de 3,5 ori mai mare decât cel al Soarelui şi prezintă faze la fel ca şi Luna privită de pe Pământ (*fig. 8.43*).

Privind Luna cu ochiul liber, putem observa pe suprafaţa ei regiuni mai întunecate denumite „mări" ce reprezintă depresiuni enorme cu adâncimea de până la 3 km, acoperite cu lavă vulcanică de culoare întunecată, şi regiuni mai luminoase numite „continente".

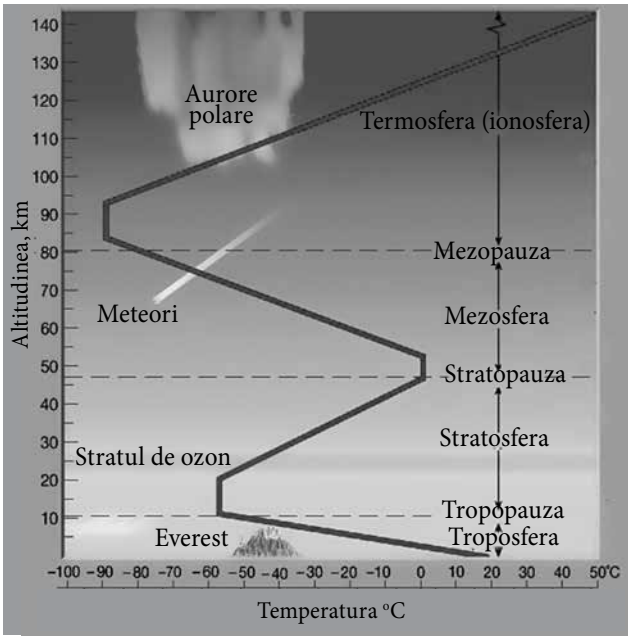



*Fig. 8.40.* Structura atmosferei Pamântului şi variaţia temperaturii ei în funcţie de înălţime

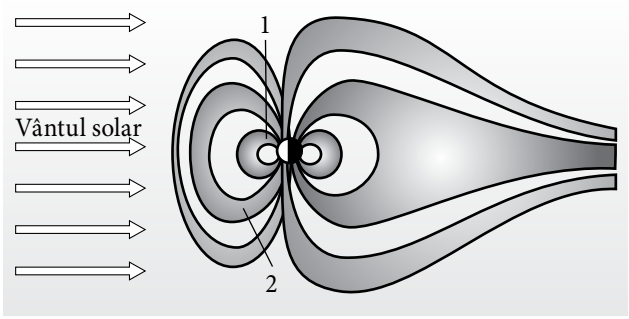



*Fig. 8.41.* Magnetosfera şi centurile de radiaţie ale Pamântului: 1 – centura interioară; 2 – centura exterioară

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

În prezent, polaritatea câmpului magnetic terestru este opusă polarităţii geografice. Polul nord magnetic e situat la sud, aproape de Antarctida, iar polul sud – la nord, în Canada. Deci acul busolei nu indică direcţia spre nordul geografic, ci spre polul sud magnetic. Polii geomagnetici îşi schimbă lent poziţia, deplasându-se pe suprafaţa Pământului cu aproximativ 55 km pe an. Există dovezi arheologice că în trecutul îndepărtat câmpul geomagnetic şi-a schimbat polaritatea şi că acest fenomen ar avea un caracter periodic.

*Fig. 8.42.* Luna

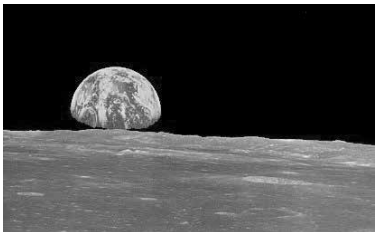


*Fig. 8.43.* Pamântul pe cerul Lunii (Foto „Apollo-11")

*Fig. 8.44.* Cratere pe Lună

*Fig. 8.45.* Astronaut pe Lună. Misiunea „Apollo-11"

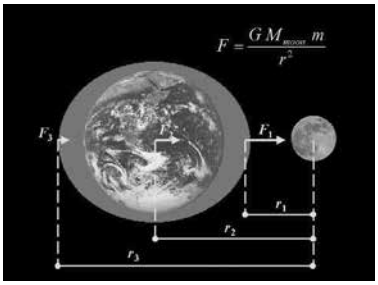



*Fig. 8.46.* Mareele

Pe Lună se află și lanțuri de munți cu înălțimea de până la 6 km. Suprafața Lunii este acoperită cu un strat de *regolit*, un amestec de praf fin și granule de rocă.

Luna suportă bombardările fără încetare ale corpurilor meteorice, în urma cărora s-au format *cratere* de impact de diverse dimensiuni și forme. Unele cratere sunt de origine vulcanică (*fig. 8.44*).

Pe acest astru nu a fost găsită apă, însă datele furnizate de sondele selenare (lunare) arată totuși că gheața este prezentă pe fundul unor cratere adânci din regiunile polare unde nu ajung razele solare.

Prima hartă a emisferei vizibile a Lunii cu denumirile mărilor și munților lunari a fost întocmită în secolul XVII de către astronomul polonez Jan Hevelius (1611–1687). Harta exactă a întregii suprafețe selenare a putut fi întocmită abia după ce partea invizibilă a Lunii a fost fotografiată pentru prima dată în 1959 de către stația interplanetară sovietică „Luna-3".

Structura internă a Lunii a fost pusă în evidență prin intermediul undelor seismice. *Scoarța* Lunii are grosimea de circa 60 km pe partea vizibilă și 100 km în emisfera invizibilă de pe Pământ. Sub scoarță se află *mantaua* cu grosimea de până la 1 000 km. Luna are un *nucleu* mic solid cu raza de câteva sute de kilometri. Luna nu are un câmp magnetic global, deși o parte din rocile de la suprafață prezintă urme de magnetism.

Luna a fost și este studiată intens cu ajutorul stațiilor automate și al navelor spațiale. La 20 iulie 1969 pe suprafața selenară au pășit primii oameni, astronauții americani Neil Armstrong și Edwin Aldrin în cadrul misiunii „Apollo-11" (*fig. 8.45*).

• **Mareele.** Forțele gravitaționale exercitate de Lună și Soare acționează nu numai asupra centrului Pământului, dar și a celorlalte învelișuri componente ale lui, inclusiv asupra oceanelor și atmosferei. De exemplu, aceeași masă de substanță, aflată în centrul Pământului, este atrasă de Lună mai slab decât pe suprafața terestră îndreptată spre Lună.

Pământul nu este un corp absolut solid, iar acțiunea diferită a forțelor gravitaționale asupra diverselor puncte ale Pământului provoacă fenomenul **mareelor**. Ca rezultat, Pământul și îndeosebi învelișul său de apă se alungește puțin pe direcția Pământ–Lună, formând două proeminențe: una pe partea îndreptată spre Lună și alta pe partea opusă (*fig. 8.46*). În punctele situate pe linia Pământ–Lună nivelul apei crește atingând cote maxime. Astfel se produce fenomenul numit **flux**. În punctele situate la 90° față de direcția Pământ–Lună, nivelul apei scade până la cote minime, producându-se fenomenul denumit **reflux**. Datorită rotației diurne a Pământului, zonele de flux și reflux cuprind, pe rând, diverse regiuni ale suprafeței terestre. Astfel, în decurs de $24^h50^m$ au loc două fluxuri și două refluxuri.

Fenomenele mareice se manifestă și în scoarța terestră care se înalță și coboară de două ori pe zi cu câțiva decimetri. Acestea au loc și în atmosfera terestră, ele provocând variația presiunii atmosferice.

Atracția Soarelui generează, de asemenea, maree în învelișul de apă al Pământului, însă ele sunt de 2,2 ori mai mici decât cele provocate de Lună din cauza distanței foarte mari de la Soare.

Mareele generează așa-numita **frecare mareică** care frânează rotația Pământului și duce la creșterea duratei zilei.

## Verificați-vă cunoștințele

1. Explicați mecanismul de generare a câmpului magnetic al Pământului.
2. Ce reprezintă aurorele polare și ce factori determină intensitatea lor?
3. Cum ar fi anotimpurile pe Terra dacă axa de rotație a Pământului ar fi perpendiculară pe planul eclipticei?
4. Pe Pământ e văzută mereu aceeași emisferă a Lunii. Cum se explică acest fapt?
5. Descrieți și explicați fenomenul luminii cenușii de pe Lună.
6. De ce pe suprafața Lunii temperatura la umbră e mai joasă cu zeci de grade față de locurile iluminate de Soare?

## d. Noțiuni de cosmogonie. Originea și evoluția Sistemului Solar

Problema originii și evoluției corpurilor cerești constituie obiectul de studiu al unui capitol special al astronomiei numit *cosmogonie*.

Originea și evoluția Sistemului Solar este o problemă extrem de complicată. Ea poate fi abordată pe cale pur teoretică prin aplicarea legilor generale ale fizicii. Acest fapt este necesar pentru a pune în evidență condițiile ce trebuiau să fi existat în trecut, pentru ca Soarele și planetele să treacă prin anumite faze de evoluție și să obțină caracteristicile pe care le au în prezent.

Potrivit ipotezelor cosmogonice moderne, Soarele împreună cu planetele s-au format din una și aceeași nebuloasă primară de gaz și praf în stare de rotație. Deși nu există încă o teorie definitivă, în prezent se conturează totuși următoarele etape principale în evoluția timpurie a Sistemului Solar (*fig. 8.47*):

a) Inițial a existat un nor uriaș de materie interstelară constituit din molecule de gaz ($H_2$, $H_2O$, OH ș.a.) și praf în stare de rotație;

b) În unele regiuni ale norului apar neomogenități care, depășind o anumită valoare critică a masei, încep să se contracte sub acțiunea forțelor de gravitație. În consecință, norul se descompune în fragmente, unul dintre care ulterior dă naștere Soarelui și Sistemului Solar;

c) Peste aproximativ 10 mii-100 mii de ani de la începutul contracției, masa nucleului fragmentului atinge circa 0,1 din masa Soarelui actual și materia devine netransparentă. Într-un timp foarte scurt, de 10-100 de ani, nucleul central se contractă și mai mult formând o protostea – *protosoarele*. Ca urmare a instabilității de rotație, în jurul protosoarelui se formează discul unei *nebuloase protoplanetare* de gaz și praf. Peste aproximativ 100 mii de ani protosoarele atinge masa Soarelui actual, însă raza e cam de 100 de ori mai mare. La această etapă începe stadiul de contracție gravitațională a protosoarelui.

Nebuloasa protoplanetară capătă o structură inelară și în regiunile ei periferice se declanșează procesul de formare a planetelor gigante. Discul de gaz și praf din jurul acestor planete mai târziu a dat naștere sistemelor de sateliți;

d) Etapa următoare are durata de circa 100 milioane de ani, în care continuă contracția gravitațională a protosoarelui. Dimensiunile lui se micșorează până aproape de cele actuale. Componenta de praf a nebuloasei protoplanetare se concentrează preponderent spre centrul discului protoplanetar. Particulele de praf, ciocnindu-se între ele, formează particule mai mari care, la rândul lor, prin agregare dau naștere unor corpuri solide. Masa corpurilor mai mari crește pe seama celor mai mici. Astfel apar corpuri masive asemănătoare cu asteroizii, numite **planetezimale**. Numărul lor fiind foarte mare, ele suferă ciocniri, în urma

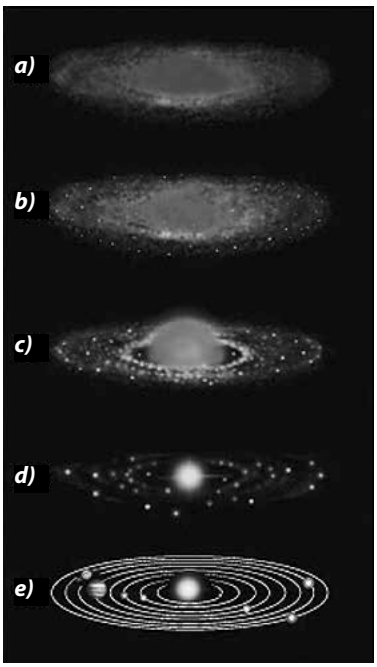



*Fig. 8.47.* Formarea Sistemului Solar

**E BINE SĂ MAI ȘTIȚI**

În secolul XVII (a. 1644), Descartes, pentru prima dată a emis ipoteza că Sistemul Solar s-a format dintr-un nor de gaz și praf. Această ipoteză a fost dezvoltată de Kant (a. 1755), care a presupus că în centrul norului s-a format Soarele, iar la periferie – planetele.
În anul 1796, Laplace a exprimat ipoteza că în procesul de formare a planetelor un rol important îl are mișcarea de rotație a nebuloasei primare în stare de contracție gravitațională și forța centrifugă de inerție. Nebuloasa ia forma de disc, iar materia de la ecuatorul discului se desprinde de nebuloasă, formând în jurul ei inele asemănătoare cu cele ale planetei Saturn. Condensarea ulterioară a gazului din aceste inele duce la formarea planetelor (*fig. 8.47*).
Cu toate că ipotezele lui Kant și Laplace par a fi verosimile, ele însă nu pot explica faptul că 98% din momentul impulsului total al Sistemului Solar revine planetelor, iar Soarelui – doar 2%.

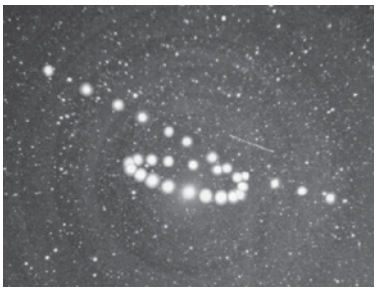


*Fig. 8.48.* Mișcarea retrogradă a planetei Marte

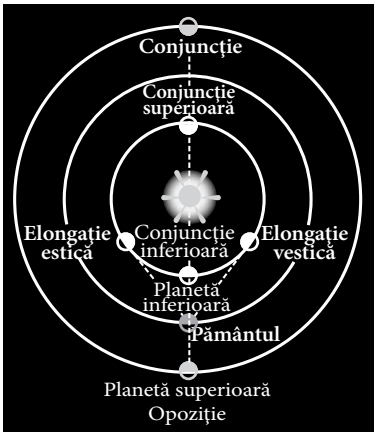



*Fig. 8.49.* Pozițiile relative și fazele planetelor

cărora unele se contopesc, altele se distrug dând naștere corpurilor meteorice. Câteva corpuri deosebit de mari devin nuclee ale viitoarelor planete de tip terestru;

e) Pământul, a cărui vârstă se estimează la 4,5 miliarde de ani, a atins dimensiunile sale actuale, probabil, în decursul unei perioade cuprinse între 100 mii și 100 milioane de ani.

## 8.4. ELEMENTE DE MECANICĂ CEREASCĂ

### a. Mișcarea aparentă a planetelor. Concepția heliocentrică a Universului

• **Mișcarea aparentă a planetelor** pe sfera cerească se deosebește de mișcarea aparentă a stelelor și a Soarelui. Planetele ale căror orbite se află în interiorul orbitei terestre sunt numite **planete inferioare** (Mercur și Venus), iar planetele ale căror orbite se află în exteriorul orbitei terestre – **planete superioare** (celelalte planete).

Mercur și Venus se mișcă pe cer în apropiere de Soare, fie la est de Soare când sunt observate seara după apusul lui, fie la vest de el când pot fi văzute dimineața înainte de răsăritul Soarelui. Unghiul dintre direcțiile Pământ–Soare și Pământ–planetă inferioară este numit **unghi de elongație** sau **elongație**. Elongația poate atinge valoarea maximă de 18–28° pentru Mercur și 45–48° pentru Venus. În popor, planeta Venus, cel mai strălucitor corp ceresc după Soare și Lună, este cunoscută ca *Luceafărul-de-dimineață* sau *-de-seară*.

Mișcarea aparentă a unei planete de la vest la est poartă numele de **mișcare directă**, iar cea de la est spre vest – **mișcare retrogradă**. Planetele un timp sunt în mișcare directă, apoi se opresc (staționează), după care își reiau deplasarea în sens opus – mișcare retrogradă, descriind pe cer niște bucle (*fig. 8.48*).

În mișcarea lor de revoluție în jurul Soarelui, planetele ocupă diverse poziții relative față de Pământ și Soare (*fig. 8.49*). În cazul când planetele inferioare sunt între Pământ și Soare, se spune că ele se află în **conjuncție inferioară** cu Soarele. În această poziție planetele se află la cea mai mică distanță de Pământ. În cazul în care planeta inferioară, Soarele și Pământul se situează pe aceeași linie, are loc **tranzitul** planetei pe discul Soarelui, ea fiind observată ca un cerculeț întunecat pe discul solar. Când planeta inferioară este dincolo de Soare, în **conjuncție superioară**, ea se află la distanța maximă de Pământ și este invizibilă.

Observate de pe Pământ, planetele inferioare prezintă **faze** ca și Luna, în funcție de poziția lor față de Soare.

Planetele superioare, de asemenea, se pot afla în diferite poziții relative față de Pământ și Soare (*fig. 8.49*). Dacă, de exemplu, Pământul este între planeta superioară și Soare, atunci planeta se află în **opoziție** cu Soarele. Opozițiile oferă cele mai favorabile condiții pentru observații. În aceste perioade planetele superioare se apropie cel mai mult de Pământ. Ele trec prin culminația superioară aproximativ la miezul nopții, fiind

vizibile pe parcursul întregii nopți. Când planeta se află dincolo de Soare în raport cu Pământul, ea este în *conjuncție* cu Soarele și nu poate fi observată.

• **Concepția heliocentrică a Universului.** Marele astronom al Antichității Aristarh din Samos (320–~250 î.Hr.), pentru prima dată, a enunțat ideea că în centrul lumii se află Soarele, iar planetele se rotesc în jurul lui. Contemporanii săi însă nu au acceptat această ipoteză, preferând concepțiile geocentrice ale lui Aristotel.

Concepțiile astronomilor antici despre Univers au fost sintetizate, în anul ~150 d.Hr., de către astronomul grec Claudiu Ptolemeu (~87–165 d.Hr.) din Alexandria (Egipt) în tratatul său de matematică și astronomie „Megale Syntaxis" (tradus în limba arabă ca *Almagest*).

Pe măsură ce precizia măsurărilor astronomice creștea, se constatau neconcordanțe dintre teoria lui Ptolemeu și observații. Marele astronom polonez Nicolaus Copernic (1473–1543) a pus la îndoială consistența principiilor fundamentale ale sistemului geocentric ptolemeic. În lucrarea sa „De revolutionibus Orbium Coelestium", publicată în 1543, Copernic a elaborat *sistemul heliocentric* al Universului. La baza acestui sistem au fost puse următoarele principii: 1) în centrul Universului se află Soarele; 2) Pământul sferic se rotește în jurul axei proprii; 3) Pământul, ca și celelalte planete, se mișcă în jurul Soarelui pe orbită circulară. Luna se mișcă în jurul Pământului; 4) toate mișcările reprezintă combinații de mișcări circulare uniforme; 5) mișcările aparente directe și retrograde ale planetelor rezultă din mișcarea Pământului.

Copernic pentru prima oară a argumentat structura corectă a Sistemului Solar, calculând distanțele relative ale planetelor de la Soare și perioadele lor de revoluție. El a explicat corect mișcările aparente complicate, directe și retrograde, ale planetelor ca o combinație a două mișcări reale în jurul Soarelui a planetei și a Pământului.

Renunțând la teza dogmatică despre imobilitatea Pământului, care secole de-a rândul stăpânea spiritele umane, Copernic a produs o revoluție nu numai în astronomie, dar și în concepția științifică despre lume.

### E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

• *Concepția geocentrică.* La baza sistemului ptolemeic al Universului, cunoscut ca *sistemul geocentric* al lumii, stau patru principii: 1) Pământul este sferic și se află în centrul Universului; 2) Pământul este nemișcat; 3) toate corpurile cerești, inclusiv Soarele și Luna, se mișcă în jurul Pământului; 4) planetele se mișcă uniform pe epicicluri, ale căror centre orbitează pe deferente în jurul Pământului (*fig. 8.50*).
Sistemul ptolemeic permitea astronomilor să explice mișcările aparente ale planetelor și să precalculeze pozițiile lor cu o precizie satisfăcătoare pentru observațiile cu ochiul liber.

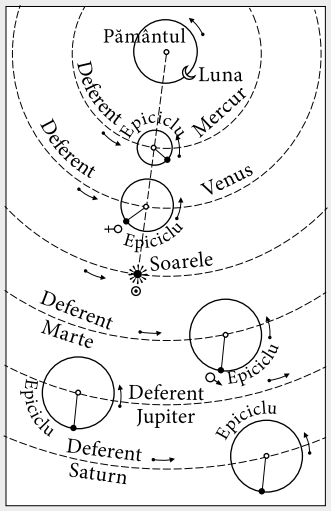



*Fig. 8.50.* Sistemul geocentric al lui Ptolemeu

• *Heliocentrismul* submina dominația religiei, care susținea dogma privind imobilitatea și poziția deosebită a Pământului în centrul Universului. De aceea la începutul sec. al XVII-lea inchiziția a declanșat o luptă necruțătoare împotriva teoriei lui Copernic și a susținătorilor ei. Astfel, în anul 1600 la Roma a fost ars pe rug Giordano Bruno (1548–1600), un susținător înflăcărat al ideilor lui Nicolaus Copernic, care promova ideea existenței mai multor civilizații în Univers.
Un alt adept al concepțiilor lui Copernic a fost marele fizician și astronom italian Galileo Galilei (1564–1642), primul om care în 1609 a îndreptat telescopul spre cer și prin descoperirile sale a confirmat teoria lui Copernic. Galileo a descoperit fazele planetei Venus, munți pe Lună și a calculat înălțimea acestora, a descoperit patru sateliți ai planetei Jupiter care acum îi poartă numele. Observând pete pe Soare și deplasarea acestora, Galileo a tras concluzia că Soarele se rotește în jurul axei sale. Privind prin telescop Calea-Lactee, Galileo a stabilit că ea este constituită dintr-o mulțime de stele.

## Verificați-vă cunoștințele

1. O planetă e văzută pe cer la distanța de 110° de la Soare. Este această planetă superioară ori inferioară?
2. Poate fi văzut Luceafărul (planeta Venus) seara în partea de est a cerului? Argumentați.
3. La 1 mai Jupiter s-a aflat în opoziție cu Soarele. În ce constelație putea fi observată planeta?
4. Ar putea avea Pământul, observat de pe Marte, o mișcare retrogradă, apoi una directă?

### b. Perioada siderală și perioada sinodică de revoluție a planetelor. Legile lui Kepler

• **Perioada siderală și perioada sinodică.** Perioada de revoluție a unei planete în jurul Soarelui față de stele este numită **perioadă siderală**, *T*. Perioada siderală a Pământului este numită **an sideral** ($T_\oplus$ = 1 an).

Intervalul de timp dintre două poziții relative identice ale unei planete în mișcarea ei aparentă se numește **perioadă sinodică**, *S*, a planetei.

Între aceste trei perioade există o relație simplă, numită **ecuația mișcării sinodice** care poate fi ușor dedusă. Pentru planetele inferioare ecuația mișcării sinodice are forma: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_\oplus}$, iar pentru cele superioare: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_\oplus} - \frac{1}{T}$.

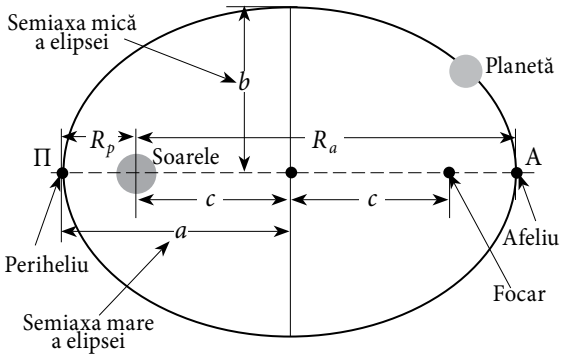
Direct din observări poate fi determinată numai perioada sinodică a planetelor, *S*, și anul sideral, $T_\oplus$. Perioada siderală a planetelor *T* se calculează folosind ecuația mișcării sinodice respective.

• **Legile lui Kepler.** În sistemul heliocentric al lui Copernic orbitele planetelor reprezintă aceleași cercuri considerate „curbe ideale", ca și în sistemul geocentric al lui Ptolemeu.

Studiind mișcarea planetei Marte în jurul Soarelui, astronomul german Johannes Kepler (1571–1630) a constatat existența unei neconcordanțe între pozițiile calculate și cele observate ale acestei planete. După mai mulți ani de muncă asiduă și calcule anevoioase, Kepler a ajuns la concluzia că orbitele planetelor nu sunt circulare, iar mișcarea lor nu este uniformă și astfel a enunțat cele trei legi fundamentale ale mișcării planetelor care îi poartă numele.

**Legea I: Fiecare planetă se mișcă pe o orbită eliptică, având Soarele în unul dintre focare (*legea elipselor*)** (*fig. 8.51*).

Forma elipsei este caracterizată de o mărime numită *excentricitate*, $e = \frac{c}{a}$, unde *c* este distanța de la centrul elipsei până la focarul său; *a* – semiaxa mare a elipsei. Excentricitatea arată cât de mult elipsa diferă de circumferință. În cazul când *c* = 0, avem *e* = 0 și elipsa se transformă într-un cerc cu raza *a*. Excentricitatea orbitei Pământului *e* = 0,017.




$R_a = a\,(1 + e)$ $\quad R_p = a\,(1 - e)$

*Fig. 8.51.* Legea I a lui Kepler

Punctul cel mai apropiat de Soare al orbitei planetei se numește *periheliu*, iar punctul cel mai îndepărtat de Soare se numește *afeliu* (*fig. 8.51*). Punctul cel mai apropiat de Pământ al orbitei Lunii sau al unui satelit artificial este numit *perigeu*, iar punctul cel mai îndepărtat – *apogeu*.

Se poate demonstra că semiaxa mare a orbitei planetei, *a*, este egală cu distanța medie a planetei de la Soare. Semiaxa mare a orbitei Pământului, adică distanța medie de la Pământ la Soare este luată drept unitate de distanță în astronomie, numită *unitate astronomică* (UA):

$a_\oplus$=1 UA = 149,6 mil. km.

**Legea a II-a: Raza vectoare a planetei descrie arii egale în intervale de timp egale (*legea ariilor egale*).**

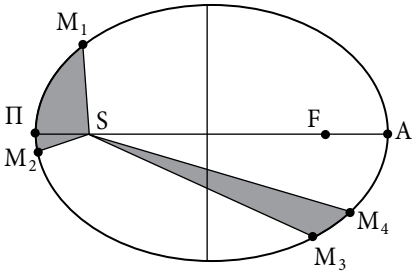



*Fig. 8.52.* Legea a II-a a lui Kepler

Raza vectoare este segmentul de dreaptă care pornește din centrul Soarelui (focarul orbitei) către centrul planetei. Conform legii a II-a, ariile $M_1SM_2$ și $M_3SM_4$ sunt egale (*fig. 8.52*). Arcele $M_1M_2$ și $M_3M_4$, parcurse de planetă în intervale de timp egale, au lungimi diferite, $M_1M_2 > M_3M_4$. Deci mișcarea planetei în jurul Soarelui nu este uniformă. Cu cât planeta este mai aproape de Soare, cu atât viteza ei este

mai mare. De exemplu, atunci când Pământul se află la periheliu, adică la distanţa minimă de Soare (în jurul datei de 3 ianuarie), viteza lui orbitală este maximă, 30,29 km/s, viteza medie fiind de 29,7 km/s.

**Legea a III-a: Pătratul perioadei siderale de revoluţie a planetei este proporţional cu cubul semiaxei mari a orbitei (*legea armoniilor*).**

Legea a III-a a lui Kepler stabileşte legătura dintre perioadele siderale şi distanţele medii ale planetelor de la Soare.

Dacă notăm cu $a_1$ şi $a_2$ semiaxele mari ale orbitelor a două planete, iar cu $T_1$ şi $T_2$ perioadele lor siderale de revoluţie, atunci legea a III-a se scrie sub forma:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Legea a III-a a lui Kepler, la fel ca şi celelalte două legi, se aplică nu numai la mişcarea planetelor, ci şi la mişcarea sateliţilor lor naturali şi artificiali. Folosind legea a III-a, semiaxele mari ale orbitelor tuturor planetelor pot fi exprimate în unităţi astronomice. Dacă vom exprima perioadele de revoluţie în ani, atunci pentru Pământ $a_\oplus = 1$ UA şi $T_\oplus = 1$ an. În acest caz perioada de revoluţie în jurul Soarelui a oricărei planete exprimată în ani este:

$$T = \sqrt{a^3}.$$

Legile lui Kepler au fost descoperite în baza datelor observaţionale şi deci sunt legi empirice. Pe baza legii gravitaţiei universale, Newton a precizat şi a generalizat legile lui Kepler. Legea a III-a generalizată, aplicată la două sisteme formate din corp ceresc central şi satelit, se scrie sub forma:

$$\frac{T_1^2 \cdot (M_1 + m_1)}{T_2^2 \cdot (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Aici $M_1$ şi $M_2$ reprezintă masele corpurilor centrale, iar $m_1$, $T_1$, $a_1$ şi $m_2$, $T_2$, $a_2$ sunt masa, perioada siderală şi semiaxa mare a orbitei sateliţilor respectivi.

Legea a III-a generalizată are o importanţă deosebită în astronomie, deoarece permite determinarea maselor corpurilor cereşti.

### Verificaţi-vă cunoştinţele

1. Folosind ecuaţia mişcării sinodice, determinaţi perioada de revoluţie a planetei Venus. Se ştie că perioada sinodică a acestei planete este de 584 de zile.
2. Asteroidul Vesta are perioada de revoluţie în jurul Soarelui de 3,63 de ani. De câte ori Vesta este mai departe de Soare decât Pământul?

## 8.5. SOARELE

### a. Structura internă şi atmosfera Soarelui

***Caracteristici generale.*** În centrul Sistemului nostru planetar este situat Soarele, o stea obişnuită cu diametrul de 109 ori şi masa de 333 000 de ori mai mare decât ale Pământului. Soarele se află la circa 150 mil. km de Pământ şi este unica stea al cărei disc e vizibil de pe Pământ. Celelalte stele, aflându-se la distanţe enorme, apar ca puncte luminoase chiar şi în cele mai mari telescoape. Soarele reprezintă o sferă de plasmă având densitatea medie de 1 410 kg/m$^3$. Temperatura la suprafaţa aparentă vizibilă a Soarelui este de circa 6 000 K.

În compoziţia Soarelui se regăsesc practic toate elementele chimice din sistemul periodic, însă predomină hidrogenul (circa 70%), după care urmează heliul (circa 29%). Celorlalte elemente le revine circa 1%.

Soarele se roteşte în jurul axei sale în acelaşi sens ca şi Pământul. Deoarece Soarele nu este un corp solid, regiunile ecuatoriale ale lui au viteze de rotaţie mai mari decât cele polare. Perioada siderală de rotaţie a regiunilor ecuatoriale este de circa 25 de zile, iar în apropiere de poli atinge 30 de zile.

Conform modelelor actuale de evoluţie a stelelor, Soarele are vârsta de 4,6 miliarde de ani şi este la mijlocul duratei sale de viaţă.

• **Structura internă şi atmosfera Soarelui.** Astrofizica modernă demonstrează că sursa principală de energie care poate să întreţină radiaţia observată a Soarelui o constituie reacţiile termonucleare de fuziune a nucleelor de hidrogen – de transformare a hidrogenului în heliu. Ele au loc în **nucleul** Soarelui având raza egală cu 0,3 din raza solară. Aici presiunea atinge $2 \cdot 10^{12}$ Pa, iar temperatura – circa $1{,}55 \cdot 10^7$ K. La asemenea temperaturi şi presiuni materia este total ionizată. Reacţiile termonucleare din nucleul Soarelui sunt însoţite de degajarea unor cantităţi uriaşe de energie.

Pentru a ajunge la suprafață, energia, degajată în urma reacțiilor de fuziune termonucleară din nucleul Soarelui, are de străbătut straturi enorme de plasmă incandescentă. În zona cuprinsă între 0,3 și 0,7 raze solare, numită **zonă radiativă**, energia se transmite de la strat la strat prin procese de absorbție și radiație.

În regiunile situate la aproximativ 0,3 raze solare de la suprafața Soarelui, energia este transmisă spre suprafață prin procese de *convecție*, adică prin deplasarea straturilor de substanță solară. Aceasta este **zona convectivă** care se extinde până la suprafața vizibilă a Soarelui. Granulația observată la suprafața Soarelui este o dovadă a proceselor de convecție.

Radiația solară aproape în întregime este emisă de învelișurile exterioare ale Soarelui care formează **atmosfera solară**: fotosfera, cromosfera și coroana solară (*fig. XV*, planșa color, p. 163).

**Fotosfera** constituie învelișul gazos netransparent al atmosferei solare ce radiază practic toată energia solară cu spectru continuu care ajunge și la Pământ. În timpul observațiilor acest strat este văzut ca suprafața aparentă a Soarelui. Grosimea fotosferei este de aproape 200 km. Densitatea gazului în fotosferă este de mii de ori mai mică decât densitatea aerului la suprafața Pământului. Strălucirea discului solar nu e uniformă, fiind în descreștere de la centru spre marginile lui. Fotosfera are o *structură granulară*, mărimea medie a granulelor fiind de aproximativ 1 000 km. *Granulele* sunt formațiuni instabile, cu durata de 7-10 min., după care dispar, iar în locul lor apar altele noi. Un alt tip de formațiuni ale fotosferei sunt *petele solare* care, de regulă, apar în grupuri formate din perechi de pete. Diametrul unei pete solare tipice este ceva mai mare ca Pământul și există câteva săptămâni. Partea centrală a petei, *umbra*, pare mai întunecată decât fotosfera strălucitoare, pentru că temperatura ei e mai joasă decât a fotosferei – aproximativ 4 100 K. În jurul petelor văzute la marginea discului solar pot fi observate formațiuni luminoase numite *facule* fotosferice. Faculele sunt mai fierbinți cu 200–300 K față de regiunile înconjurătoare și reprezintă formațiuni relativ stabile care pot exista câteva săptămâni.

Deasupra fotosferei se află un strat de 12 000–15 000 km al atmosferei solare numit **cromosferă**. Densitatea substanței în cromosferă este mult mai mică decât în fotosferă. Strălucirea cromosferei este de sute de ori mai slabă decât a fotosferei, de aceea ea poate fi observată doar în timpul eclipselor totale de Soare ca o fâșie inelară strălucitoare de culoare roz. Cromosfera are o structură neomogenă mult mai pronunțată decât granulația fotosferei. Cele mai mici formațiuni ale ei, numite *spicule*, se văd bine la marginea discului solar sub formă de jeturi de câteva mii de kilometri lungime.

**Coroana solară** este partea exterioară extrem de rarefiată a atmosferei solare, care trece treptat în mediul interplanetar sub forma vântului solar care se propagă de la Soare. Ea poate fi observată cu ochiul liber numai în timpul eclipselor totale de Soare când apare ca o aureolă sidefie în jurul discului solar. În coroană sunt observate formațiuni active numite *protuberanțe*, ce reprezintă nori denși de plasmă. De cele mai multe ori protuberanțele au aspectul unor structuri verticale arcuite (*fig. XV*, planșa color, p. 163). Coroana de plasmă a Soarelui este un generator continuu de particule încărcate (electroni și protoni) care formează *vântul solar*.

## b. Activitatea solară și relațiile Soare–Pământ

Numărul de pete solare în fotosfera Soarelui variază în limite foarte largi. În unii ani ele pot fi numeroase, alteori suprafața Soarelui este absolut curată luni la rând. La fel variază și aria acoperită cu facule. Acest fenomen de variație a numărului de pete solare are perioada medie de 11,1 ani, numită **ciclu de activitate solară**. Cercetările arată că de la un ciclu la altul petele își schimbă polaritatea magnetică, astfel încât *ciclul complet* de activitate a Soarelui constituie 22,2 ani.

O altă manifestare a activității solare sunt **erupțiile solare** – explozii extrem de violente cu durata de până la două ore care se produc în cromosferă și coroană, într-o mică regiune dintre petele solare în dezvoltare. Fluxul de electroni și protoni generat de asemenea erupții ajunge la Pământ în câteva zile.

Fenomenele care se produc în Soare au o influență nemijlocită asupra Pământului. Particulele **vântului solar**, protonii și electronii, se mișcă cu viteze de 400–1 000 km/s și pătrund în spațiul circumterestru peste 1-2 zile după erupțiile solare. Ele provoacă fenomenele geofizice care se produc pe Pământ, cum ar fi aurorele polare (*fig. XVI*, planșa color, p. 163), furtunile geomagnetice etc. Aurorele polare sunt generate de particule încărcate ce pătrund în atmosferă în regiunile polare mișcându-se în spirală de-a lungul liniilor de inducție ale câmpului magnetic al Pământului.

Vântul solar, generat de o erupție solară puternică, perturbează câmpul magnetic al Pământului, fenomen cunoscut ca **furtună geomagnetică** care poate

afecta grav liniile de telecomunicaţie şi radiocomunicaţie, reţelele electroenergetice terestre, funcţionarea aparatelor cosmice, precum şi sănătatea oamenilor.

Datorită energiei solare, atmosfera, oceanele şi continentele terestre se încălzesc. Există o legătură directă dintre ciclurile de activitate solară şi clima pe Pământ.

Energia solară, fiind cea mai ecologică, este utilizată pe scară tot mai largă în instalaţiile heliotehnice (centralele electrice solare, serele, instalaţiile de încălzire a apei şi a locuinţelor etc.). Bateriile solare servesc drept surse de energie electrică la bordul sateliţilor artificiali ai Pământului şi al staţiilor cosmice.

O importanţă deosebită are stratul de ozon din atmosfera terestră, care se formează sub acţiunea razelor solare ca produs al reacţiilor fotochimice din stratosferă. Stratul de ozon protejează viaţa terestră de acţiunea radiaţiei ultraviolete. Căldura şi lumina emise de Soare fac posibilă existenţa vieţii pe planeta noastră.

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

Strălucirea Soarelui este extrem de intensă. Prin urmare, este interzis categoric să-l privim direct fie cu ochiul liber, fie prin instrumente optice, deoarece el poate provoca orbirea ireversibilă. Pentru a fi observat şi studiat, Soarele este, de obicei, proiectat pe un ecran special.

## 8.6. STELELE

### a. Clasificarea stelelor

***Caracteristici generale.*** Stelele apar pe cer ca nişte puncte luminoase strălucitoare. Un telescop şcolar cu diametrul de 8–10 cm ne permite să observăm aproape un milion de stele. Toate aceste corpuri cereşti fac parte din marea familie a stelelor legate fizic între ele prin forţe gravitaţionale, care formează sistemul nostru stelar numit Galaxia Calea-Lactee.

Există două caracteristici fizice ale stelelor care pot fi observate cu ochiul liber: strălucirea aparentă şi culoarea.

**Stelele reprezintă corpuri cereşti ce radiază lumină proprie ca şi Soarele.**

Ideea că stelele sunt nişte „sori" a fost exprimată încă în Antichitate, iar mai târziu de Giordano Bruno.

Strălucirea aparentă a stelelor este exprimată printr-o mărime numită **magnitudine aparentă**. Aceasta caracterizează fluxul de radiaţie (lumină) incident pe unitatea de arie a unei suprafeţe. Magnitudinea aparentă se notează cu litera *m*. S-a convenit că stelele de magnitudinea aparentă $1^m$ sunt mai strălucitoare de 100 de ori decât stelele de magnitudinea $6^m$. O stea de magnitudinea $1^m$ e mai strălucitoare de 2,512 ori decât o stea de magnitudinea $2^m$ ş.a.m.d. Cele mai strălucitoare stele au magnitudini negative. De exemplu, steaua Vega are magnitudinea aparentă $0{,}3^m$, iar Soarele are magnitudinea aparentă egală cu $-26{,}8^m$.

**Energia radiată de o stea în unitatea de timp în toate direcţiile pe toate lungimile de undă este numită *luminozitate*.**

De obicei, luminozitatea stelelor se exprimă în luminozităţi solare (luminozitatea Soarelui fiind luată drept unitate).

• **Clasificarea stelelor.** Stelele au strălucire şi culori diferite. Strălucirea stelelor depinde de dimensiunile lor şi de distanţa la care se află, iar culoarea – de temperatura lor. Din observaţii s-a stabilit că stelele au temperaturi cuprinse între 2 500 şi 50 000 K. Cele mai fierbinţi sunt stelele *albastre*, urmate de stelele *albe* care sunt mai reci, apoi de cele *galbene*, *portocalii*. Cele mai reci se consideră stelele *roşii*. *Stele albe* sunt, de exemplu, Vega (constelaţia Lira) şi Altair (constelaţia Vulturul), vizibile la noi vara şi toamna, Sirius (constelaţia Câinele-Mare) – cea mai strălucitoare stea de pe cer, vizibilă iarna. Cele mai cunoscute *stele roşii* sunt Betelgeuse (constelaţia Orion) şi Aldebaran (constelaţia Taurul), vizibile iarna, Antares (constelaţia Scorpionul) – vizibilă vara. Dintre *stelele albastre* vom menţiona Spica (constelaţia Fecioara). Soarele nostru face parte din categoria stelelor *galbene*. O altă stea galbenă este Capella (constelaţia Vizitiul), vizibilă iarna.

În funcţie de spectrele lor, stelele au fost împărţite în aşa-numite **clase spectrale**, notate cu litere ale

**E BINE SĂ MAI ŞTIŢI**

Culoarea unei stele, ca şi a unui corp încălzit, este determinată de temperatura ei. Acest fapt ne permite să determinăm temperatura stelelor după distribuţia energiei în spectrul lor. Majoritatea stelelor au spectrul continuu întretăiat de linii întunecate de absorbţie. Radiaţia emisă de stea are intensitatea maximă pe o anumită lungime de undă care depinde de temperatura ei. Relaţia dintre această lungime de undă şi temperatură este dată de legea lui Wien: $\lambda_{max} = b/T$. Aici $b = 2\,898\ \mu m \cdot K$, $T$ se exprimă în kelvini, K, iar $\lambda_{max}$ în micrometri, μm.

alfabetului latin: O-B-A-F-G-K-M și 10 subclase (de la 0 la 9). În această clasificare Soarele face parte din clasa spectrală G2. Studiind spectrul stelelor, se pot determina astfel de parametri ca presiunea și compoziția chimică a gazului din atmosferele lor, perioada de rotație a stelei în jurul axei proprii, prezența câmpului magnetic, viteza radială ș.a.

### Verificați-vă cunoștințele

1. Dincolo de limitele atmosferei terestre, stelele și planetele pot fi observate și ziua. De ce acestea nu se văd ziua și la suprafața Pământului?
2. De câte ori este mai strălucitor Luceafărul (Venus), având magnitudinea aparentă egală cu $-4{,}4^m$, față de Sirius, cea mai strălucitoare stea din constelația Câinele-Mare, care are magnitudinea de $-1{,}58^m$?

## b. Diagrama „spectru–luminozitate". Evoluția stelelor. Stelele variabile și nestaționare

• **Diagrama „spectru–luminozitate".** La începutul secolului XX, astronomul danez Hertzsprung și astrofizicianul american Russell au stabilit că există o dependență între spectrul stelei (adică temperatura ei) și luminozitatea acesteia. Dependența dată poate fi reprezentată sub forma unei diagrame în care o axă este clasa spectrală sau temperatura stelei, iar o altă axă reprezintă luminozitatea stelei. Diagrama astfel construită este numită diagrama „spectru–luminozitate" sau diagrama „Hertzsprung–Russell" (*fig. XVII*, planșa color, p. 163).

Cele mai multe stele sunt dispuse pe diagonala numită **secvența principală** care pleacă din colțul stâng de sus spre colțul drept de jos al diagramei. În partea de sus a secvenței principale se află stelele cele mai fierbinți, iar în partea de jos – cele mai reci, care sunt stele **pitice**. În partea dreaptă de sus a diagramei se găsesc stelele **gigante** și **supergigante** strălucitoare. Mai jos de secvența principală, paralel cu ea, este dispusă seria stelelor **subpitice**.

• **Evoluția stelelor.** Diagrama „spectru–luminozitate" este un instrument foarte important de studiere a stelelor. Poziția stelei într-un punct de pe diagramă este determinată de proprietățile fizice și stadiul de evoluție al ei. Analiza diagramei arată că există grupuri de stele cu proprietăți fizice asemănătoare. Ea permite, de asemenea, să se stabilească o dependență între caracteristicile stelelor.

• **Stelele variabile.** Pe cer pot fi observate două sau mai multe stele situate aparent foarte aproape una de alta. Sistemul de două stele separate printr-o distanță unghiulară foarte mică este numit **stea dublă** (*fig. 8.53*). În Calea-Lactee, aproape jumătate din stele formează sisteme duble sau multiple.

Unele stele se proiectează aparent pe sfera cerească ca un sistem dublu, însă în realitate ele se află la distanțe enorme una de alta, nefiind legate prin forțe de atracție gravitațională. Astfel de stele au denumirea de *stele duble optice*.

În cazul când două stele sunt legate prin forțe de atracție gravitațională și se rotesc în jurul unui centru comun de masă, formând un sistem dinamic, ele se numesc *stele duble fizice* sau *stele binare*. Dacă planul orbitei sistemului binar conține și raza vizuală, stelele componente se pot eclipsa reciproc. Aceste binare se mai numesc și *variabile cu eclipsă*.

Sistemele de stele binare sunt importante în astrofizică, pentru că din observații asupra orbitelor acestora se pot determina masele lor.

Strălucirea unor stele variază cu timpul datorită proceselor fizice care se produc în interiorul sau în atmosferele lor. Procesele date sunt însoțite de variații ale parametrilor fizici ai stelelor (luminozitatea, volumul, densitatea, clasa spectrală ș.a.). Stelele de acest tip sunt numite *stele variabile fizice*.

Există trei tipuri de stele variabile: *pulsante* – stele a căror rază se contractă și se dilată alternativ datorită proceselor naturale de evoluție a stelelor; *eruptive* – stele pe suprafața cărora se produc erupții, cum ar fi protuberanțe sau ejectări de materie; *cataclismice* – stele care își schimbă proprietățile în urma unor cataclisme, cum se întâmplă cu *novele* și *supernovele*.

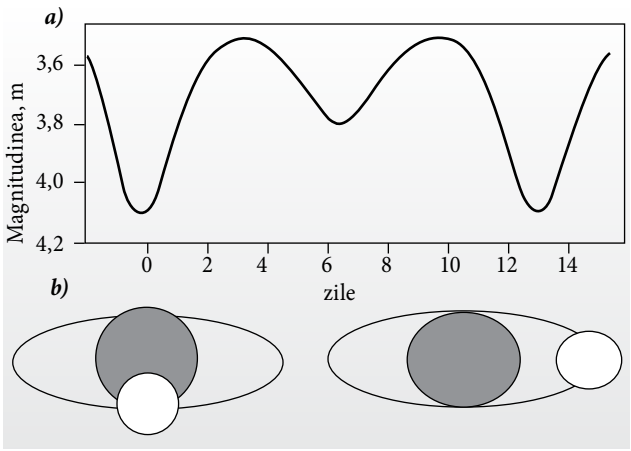



*Fig. 8.53.* Steaua dublă Beta Lyrae: curba de lumină (a); schema sistemului dublu (b)

**Novele** reprezintă variabile cataclismice, la care cel puţin o dată a fost observată o creştere bruscă a luminozităţii (o erupţie). În timpul erupţiei, luminozitatea ei creşte de zeci şi sute de mii de ori în decurs de 2-3 zile. Spectrul novelor arată că în momentul de strălucire maximă ele sunt asemănătoare cu supergigantele din clasele spectrale A–F, iar după erupţie – cu nişte pitice fierbinţi. Se consideră că novele constituie *sisteme binare compacte* reprezentând o pereche de stele, situate la o distanţă mică una de alta. Un rol important în evoluţia sistemului binar compact îl joacă forţele de interacţiune mareică dintre componentele sistemului. Până în prezent au fost înregistrate peste 400 de nove, dintre care 150 în Galaxia noastră, iar restul în nebuloasa Andromeda şi în galaxiile Norul Mare şi Norul Mic ale lui Magellan.

În faza finală a evoluţiei, stelele cu masa mai mare de 8 mase solare trec prin stadiul numit erupţie de **supernovă** care se caracterizează printr-o explozie catastrofală, însoţită de degajarea unor cantităţi enorme de energie. Supernovele îşi măresc brusc, în numai câteva ore, luminozitatea de zeci de milioane de ori, depăşind chiar şi luminozitatea galaxiei din care fac parte. Erupţia durează, de obicei, câteva sute de zile, în care supernova radiază tot atâta energie cât emite Soarele pe durata existenţei sale. Până în prezent au fost înregistrate circa 500 de supernove în alte galaxii şi vreo zece în Galaxia noastră. Cea mai remarcabilă a fost erupţia supernovei observată în anul 1054 în constelaţia Taurul şi descrisă de astronomii chinezi şi japonezi ca o stea ce se vedea şi ziua. Astăzi în acel loc se poate observa faimoasa nebuloasă gazoasă Crab (*fig. 8.54*). Ultima erupţie de supernovă a fost descoperită la 24 februarie 1987 în galaxia Norul Mare al lui Magellan.

Fenomenele care se produc în ultimele stadii ale evoluţiei stelelor masive se încheie cu contracţia gravitaţională catastrofală, urmată de o explozie termonucleară a întregii stele, după care ea se transformă în *stea neutronică* sau *gaură neagră*.

• **Stelele nestaţionare.** În stadiile finale de evoluţie, stelele se transformă în obiecte cu proprietăţi neobişnuite: pitice albe, stele neutronice şi găuri negre.

**Piticele albe** reprezintă stele foarte compacte având masa de ordinul masei Soarelui, însă raza de 100 de ori mai mică. Din această cauză ele au densităţi enorme, care ating mai multe tone pe centimetru cub. Piticele albe au temperaturi înalte care ating 70 000 K, însă luminozitatea lor e slabă datorită dimensiunilor mici. În diagrama „Hertzsprung–Russell" ele se situează în partea stângă jos (*fig. XVII*, planşa color, p. 163). Piticele albe sunt lipsite de surse termonucleare de energie, de aceea ele se răcesc lent pentru că radiază energia termică stocată în adâncurile lor la etapele anterioare de evoluţie.

Masa piticelor albe nu poate depăşi valoarea de 1,44 mase solare. Dacă masa acestora trece peste această limită, ele devin instabile şi trec în starea de contracţie rapidă, numită *colaps*, care în unele cazuri se sfârşeşte cu apariţia unei **stele neutronice**.

Masa minimă a stelelor neutronice este de 0,1 mase solare. Procesele de transformare a materiei stelare în neutroni devin dominante la densităţi foarte mari, fiind însoţite de radiaţia de neutrini. Întrucât raza stelei cu masa dată este de circa 10-15 km, densitatea ei constituie cca $2 \cdot 10^{17}$ kg/m$^3$, adică aproape de densitatea materiei nucleare. Studiile teoretice arată că stelele neutronice nu pot avea mase mai mari de 2-2,5 mase solare.

Atunci când o stea obişnuită prin contracţie gravitaţională (colaps) devine stea neutronică, câmpul ei magnetic se intensifică rapid, atingând valori de mii de ori mai înalte decât în interiorul atomului.

În anul 1967 a fost înregistrată o radiaţie radio de origine cosmică, emisă de o sursă punctiformă sub formă de impulsuri scurte care se repetau la intervale strict constante de timp. Aceste obiecte cereşti au fost numite **pulsari**. În prezent se cunosc cca 1 000 de pulsari, având perioade de la 1,5 ms la 4,5 s. Radiaţia radio a pulsarilor este puternic polarizată şi nu este de natură termică. Pulsarii sunt obiecte relativ apropiate, aflate în Galaxia noastră. Unul dintre cei mai remarcabili pulsari coincide cu una din cele două stele existente în centrul nebuloasei Crab (*fig. 8.54*).

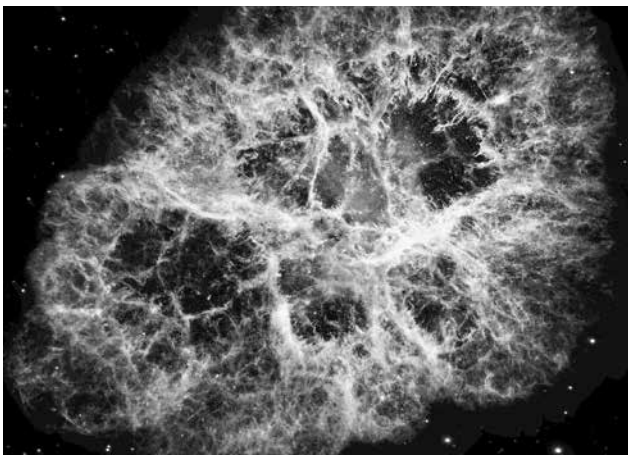


*Fig. 8.54.* Nebuloasa Crab

În cazul când masa unei stele este de câteva ori mai mare decât masa Soarelui, forţele de presiune interioară nu se mai pot opune forţelor gravitaţionale. Contracţia gravitaţională (colapsul) a stelei continuă până când raza stelei se apropie de valoarea critică numită **raza gravitaţională** Schwarzschield, $R_{grav} = 2GM/c^2$, unde $G$ este constanta gravitaţională, $M$ – masa stelei. Viteza parabolică (a doua viteză cosmică) pe stea devine egală cu viteza luminii în vid, $c$. Dacă raza obiectului este mai mică decât raza gravitaţională, lumina nu mai poate părăsi obiectul, el nu mai radiază şi deci nu poate fi observat. Aceste corpuri cereşti prezise pe cale teoretică sunt numite **găuri negre**.

În interiorul găurii negre şi în apropiere de suprafaţa ei exterioară legile fizicii clasice ale lui Newton nu mai sunt valabile. În acest caz este necesară aplicarea legilor teoriei relativităţii generalizate a lui Einstein.

## 8.7. NOŢIUNI DE COSMOLOGIE

### a. Galaxia noastră. Roiuri stelare. Mişcarea proprie a stelelor şi a Sistemului Solar. Mişcarea de rotaţie a Galaxiei

• **Galaxia noastră.** Fâşia luminoasă observată într-o noapte de vară cu cer senin traversând bolta cerească de la nord-vest spre sud-est e cunoscută sub numele de Calea-Lactee. Aceasta nu este altceva decât Galaxia noastră care cuprinde toate stelele vizibile pe sfera cerească, inclusiv Sistemul nostru Solar. Poziţia Căii-Lactee faţă de orizont variază considerabil, datorită mişcării diurne şi anuale a sferei cereşti.

Galaxia reprezintă un sistem stelar sub formă de disc, simetric faţă de planul ei principal (*fig. 8.55*). Grosimea discului este de 16 mii de ani-lumină, iar diametrul constituie circa 100 mii de ani-lumină. Soarele se află la aproximativ 33 mii ani-lumină de centrul ei (1 an-lumină = 63 240 UA).

Numărul total de stele în Galaxia noastră se estimează la circa 150 de miliarde. Majoritatea stelelor Galaxiei este concentrată în *discul stelar galactic*. Galaxia noastră este alcătuită din obiecte dintre cele mai diferite – stele masive fierbinţi şi pitice albe tinere, gigante roşii şi obiecte intermediare între stele şi planete, numite „pitice brune", *nebuloase planetare* şi *difuze*, nori de gaz şi praf interstelar ş.a. Obiectele tinere ale discului formează o structură complexă, numită *braţe spirale*, asemănătoare cu braţele spirale observate la alte galaxii. În braţele spirale sunt concentrate stele tinere şi cantităţi masive de gaz.

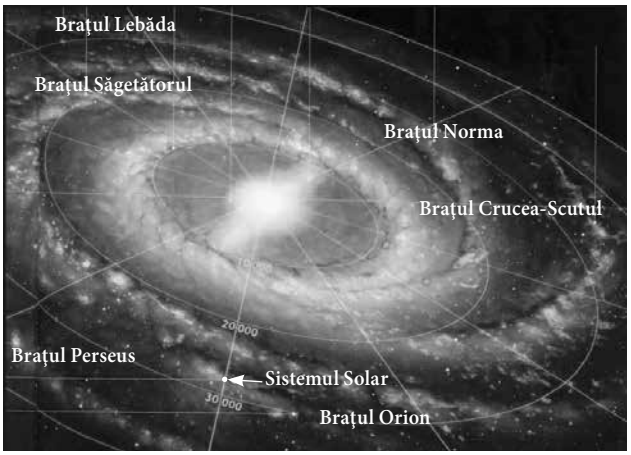



*Fig. 8.55.* Structura Galaxiei (Căii-Lactee) şi locul Sistemului Solar în Calea-Lactee

În centrul Galaxiei, în direcţia spre constelaţia Săgetătorul se află nucleul ei. Nucleul emite un flux enorm de energie care poate fi explicat prin existenţa unei găuri negre masive ce depăşeşte masa Soarelui de câteva milioane de ori. Existenţa acesteia pare a fi confirmată de observatoarele Röntgen orbitale, precum şi prin observaţii în domeniul radio.

• **Roiuri stelare.** Majoritatea stelelor formează sisteme stelare cu un centru comun de masă legate prin forţe gravitaţionale: stele multiple (duble, triple, cvadruple) şi roiuri stelare. La rândul lor, roiurile stelare pot fi deschise sau globulare.

*Roiurile stelare deschise* conţin zeci, sute, iar uneori şi mii de stele având densitatea stelară relativ mică. Aceste roiuri numite şi *roiuri dispersate* sunt situate, în majoritatea lor, în apropierea planului ecuatorial galactic. Astăzi se cunosc peste 800 de roiuri de acest tip accesibile observaţiilor. Se estimează că în Calea-Lactee ar putea fi câteva zeci de mii de roiuri dispersate, însă cu ochiul liber pot fi văzute numai două roiuri deschise: Pleiadele (circa 120 de stele strălucitoare) (*fig. 8.56*), cunoscute în popor sub denumirea de „Cloşca-cu-Pui", şi Hyadele (circa 100 de stele), ambele situate în constelaţia Taurul.

*Roiurile stelare globulare* conţin zeci şi sute de mii, iar în unele cazuri – chiar milioane de stele. Ele au o distribuţie sferică cu o mare concentraţie de stele spre centrul roiului (*fig. 8.57*). În Galaxia noastră s-au identificat circa 130 de roiuri globulare, dar se estimează că numărul lor ar fi mai mare. Aceste roiuri au luminozitatea mare, cel mai strălucitor fiind roiul ω din constelaţia Centaurul cu magnitu-

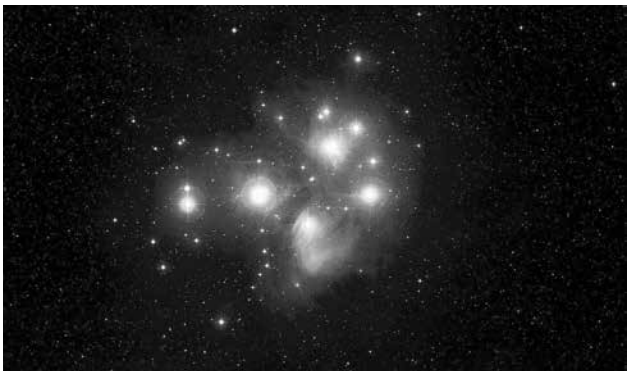


*Fig. 8.56.* Roiul *Pleiadele*

dinea $4^m$, vizibil cu ochiul liber în emisfera sudică. Roiurile globulare conţin stele gigante roşii şi galbene cu vârsta de 8–10 miliarde de ani, precum şi supergigante. În aceste roiuri au fost descoperite surse de radiaţie Röntgen, aceasta conducând la ipoteza că în centrul lor s-ar afla găuri negre.

• **Mişcarea proprie a stelelor.** Comparând poziţiile aceloraşi stele determinate la intervale considerabile de timp, s-a descoperit că coordonatele stelelor variază în timp. O parte din aceste variaţii este determinată de diverse efecte legate de mişcările Pământului şi poziţia observatorului.

**Deplasarea stelei pe sfera cerească în decursul unui an care persistă şi după eliminarea acestor efecte este numită *mişcare proprie* a stelei şi se exprimă în secunde de arc pe an.**

Mişcările proprii ale diverselor stele diferă ca mărime şi direcţie şi nu depăşesc câteva secunde de arc, cu excepţia stelei „zburătoare" Barnard (din constelaţia Ophiuchus „Îmblânzitorul-de-Şerpi") cu cea mai mare mişcare proprie – circa 10″ pe an. Mişcările proprii ale stelelor fiind foarte mici, variaţiile poziţiilor aparente ale lor nu pot fi observate cu ochiul liber, de unde a şi apărut noţiunea de „stele fixe". Proiecţia vitezei spaţiale a stelei pe raza vizuală se numeşte *viteză radială*, $v_r$.

*Fig. 8.57.* Roi globular de stele

• **Mişcarea Sistemului Solar în Galaxie.** Soarele împreună cu planetele care se rotesc în jurul lui, inclusiv Pământul, de asemenea se mişcă în spaţiu. Punctul de pe sfera cerească spre care este orientat vectorul vitezei Soarelui este numit *Apex solar*. Soarele se mişcă spre acest punct cu viteza de 20 km/s.

• **Mişcarea de rotaţie a Galaxiei. Anul galactic.** Studiind mişcările proprii şi vitezele radiale ale obiectelor foarte îndepărtate, se pot obţine date despre mişcările care au loc în întreaga Galaxie. În urma măsurărilor vitezelor radiale ale stelelor s-a constatat că stelele apropiate de Soare se mişcă împreună cu el în jurul centrului Galaxiei. Această mişcare este o consecinţă a rotaţiei Galaxiei, care se produce în sens orar dacă e privită din polul nord al Galaxiei situat în constelaţia Cosiţa-Berenicei. Soarele şi stelele din vecinătatea sa efectuează o rotaţie completă în jurul centrului Galaxiei în aproximativ 240–250 milioane de ani. Acest interval de timp este numit *an galactic*.

## b. Clasificarea galaxiilor. Galaxii cu nuclee active. Quasarii. Expansiunea Universului. Marea Explozie

Originea şi evoluţia Universului constituie obiectul de studiu al unui capitol din astronomie numit *cosmologie*. Cosmologia studiază proprietăţile fizice, structura şi evoluţia Universului în ansamblu, în special, ale spaţiului cosmic accesibil observaţiilor directe, numit deseori **Metagalaxie**.

• **Clasificarea galaxiilor.** În afara Galaxiei noastre, există şi alte sisteme stelare uriaşe, numite **galaxii**, al căror număr depăşeşte 100 de milioane şi care apar pe cer ca nişte **nebuloase**. Trei dintre acestea pot fi observate pe cer cu ochiul liber sub forma unor pete mici abia vizibile: Norul Mare şi Norul Mic ai lui Magellan, vizibili în emisfera de sud, şi nebuloasa Andromeda din constelaţia cu acelaşi nume (*fig. 8.58*). Miliardele de alte galaxii îndepărtate sunt atât de slabe, încât nu pot fi observate decât cu ajutorul celor mai mari telescoape moderne.

Se presupune că în regiunile exterioare ale galaxiilor predomină așa-numita *materie întunecată* (*ascunsă*) de natură încă necunoscută, a cărei masă este comparabilă sau chiar depășește considerabil masa totală a stelelor și a gazului interstelar.

Galaxiile diferă foarte mult unele de altele. După forma exterioară și strălucire, ele se împart în galaxii eliptice, spirale, lenticulare și neregulate.

**Galaxiile eliptice** (E0–E7, *fig. 8.59*) au forma de elipsă fără un contur distinct. Ele nu prezintă vreo structură în interior. Aceste galaxii constituie cam un sfert din numărul celor observate.

**Galaxiile spirale** (Sa–Sc, SBa–SBc, *fig. 8.59*) reprezintă circa jumătate din numărul galaxiilor, adică sunt cele mai răspândite. Dintre ele face parte și Galaxia noastră, dar și nebuloasa Andromeda. Aceste galaxii au o structură caracteristică de *brațe spirale*, care conțin stele tinere strălucitoare, roiuri stelare și nebuloase gazoase luminoase.

În multe galaxii spirale stelele din regiunea interioară formează o punte – o bară – de la capetele căreia pornesc ramurile spirale.

**Galaxiile lenticulare** (S0, *fig. 8.59*) sunt asemănătoare cu cele eliptice, însă au discul din stele, fapt care le aseamănă și cu galaxiile spirale, deși se deosebesc de acestea prin absența componentei plane și a brațelor spirale.

**Galaxiile neregulate** au forme nesimetrice, gazul interstelar și stelele fiind împrăștiate pe întreg discul galactic. Galaxiile respective conțin multe stele tinere.

• **Galaxii cu nuclee active.** Nucleele unor galaxii au un șir de proprietăți cu totul deosebite, iar fenomenele care se produc în ele încă nu sunt studiate în măsură suficientă. Nucleele multor galaxii emit

*Fig. 8.58.* Nebuloasa Andromeda

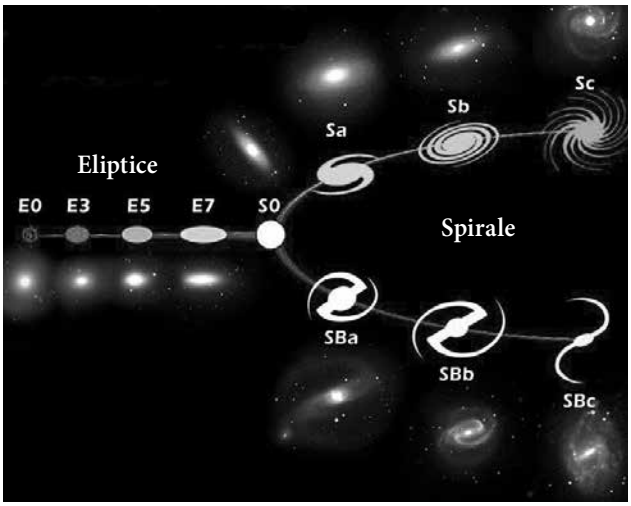



*Fig. 8.59.* Clasificarea galaxiilor

cantități uriașe de energie, comparabile sau chiar mai mari decât energia totală radiată de toate stelele din galaxie. Nucleele galaxiilor în care are loc degajarea intensă de energie sunt numite **nuclee active**. Numărul galaxiilor cu nuclee active constituie câteva procente față de numărul galaxiilor normale.

Galaxiile spirale masive, în centrul cărora se observă o sursă de radiație de dimensiuni unghiulare foarte mici, al cărei spectru nu este de natură termică, poartă denumirea de *galaxii Seyfert*. O particularitate a acestor galaxii constă în faptul că radiația nucleului este variabilă, având perioada de câteva luni, săptămâni sau chiar zile.

**Radiogalaxiile** fac parte din galaxiile eliptice masive și se caracterizează prin radiații radio de zeci de mii de ori mai intense decât radiația radio a galaxiilor normale. Această radiație radio, numită sincrotronă, este determinată de mișcarea în câmp magnetic a unor nori de particule relativiste. Radiogalaxia cea mai apropiată de noi se află în constelația Centaurul (radiosursa Centaurus A).

• **Quasarii.** În 1963, unele surse de radiație radio de dimensiuni mici au fost identificate ca fiind obiecte asemănătoare cu stelele. Ele au fost numite *quasari*, ceea ce înseamnă **radiosurse cvasistelare**. În prezent se cunosc mii de asemenea obiecte. Liniile spectrale ale quasarilor prezintă o deplasare considerabilă spre roșu. Valorile mari ale deplasării spre roșu arată că quasarii sunt obiecte extragalactice, situate la miliarde de ani-lumină depărtare. Unul dintre cei mai apropiați quasari este 3C 273, observat la circa 3 miliarde de ani-lumină de Pământ.

Quasarii au proprietăţi asemănătoare cu cele ale nucleelor galactice active. Ei reprezintă obiecte compacte ce se caracterizează prin radiaţie variabilă de natură netermică de mare intensitate. Observaţiile ne demonstrează că mulţi quasari sunt cu adevărat nuclee de galaxii foarte active. Mecanismul degajării cantităţilor enorme de energie de către nucleele galactice şi quasari nu este încă cunoscut.

• **Expansiunea Universului.** În anul 1920, astronomul american Edwin Hubble a demonstrat că nebuloasele spirale observate sunt în realitate alte galaxii asemănătoare cu Galaxia noastră, situate la milioane şi miliarde de ani-lumină depărtare. El a descoperit că liniile din spectrele majorităţii galaxiilor sunt deplasate spre roşu. Aceasta înseamnă că galaxiile se depărtează unele de altele, adică Universul este în expansiune. Galaxiile mai îndepărtate şi deci cu o strălucire mai slabă au o deplasare spre roşu mai mare, ceea ce înseamnă că ele se depărtează cu o viteză mai mare. Hubble a stabilit legea:

$$V = H \cdot r,$$

unde $V$ este viteza relativă a galaxiilor, $H$ – o constantă dependentă de timp, numită constanta lui Hubble care are un profund sens fizic, iar $r$ – distanţa până la galaxie. Valoarea inversă a acestei constante este egală cu „vârsta" Universului considerată astăzi a fi egală cu 13,7 miliarde de ani. Această valoare este în concordanţă cu vârsta majorităţii galaxiilor şi a celor mai bătrâne stele din Galaxia noastră.

• **Marea Explozie (Big Bang).** Descoperirea expansiunii Universului conduce la teoria Marii Explozii. Potrivit acestei teorii, iniţial Universul se afla într-o stare fierbinte superdensă, numită **singularitate**, în care valorile presiunii şi densităţii materiei tind către infinit. Starea substanţei în apropiere de singularitate nu poate fi descrisă cu ajutorul legilor fizicii cunoscute astăzi. Dilatarea a început de la această stare într-un moment numit convenţional **Marea Explozie** (în engleză – *Big Bang*).

Un rol important în descoperirea a milioane de galaxii foarte îndepărtate care s-au format în stadiile timpurii de evoluţie a Universului l-a avut telescopul spaţial Hubble.

O confirmare a teoriei *Marii Explozii*, elaborate în baza teoriei relativităţii generalizate a lui Einstein este considerată descoperirea în 1965 a *radiaţiei radio cosmice de fond*, care este de natură termică, corespunde temperaturii de 2,73 K şi a fost emisă de materia fierbinte în Universul foarte timpuriu.

*Tabelul 1*

**Planetele Sistemului Solar (date generale)**

| Planeta | Distanţa medie până la Soare, UA | Masa (în mase terestre) | Raza medie, km | Densitatea medie, kg/m$^3$, 10$^3$ | Perioada siderală, ani | Perioada de rotaţie axială | Viteza orbitală medie, km/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mercur** | 0,387 | 0,056 | 2 437 | 5,5 | 0,24 | 58,7$^d$ | 47,9 |
| **Venus** | 0,723 | 0,82 | 6 052 | 5,2 | 0,61 | 243,1$^d$ | 35,0 |
| **Pământ** | 1,0 | 1,0 | 6 370 | 5,5 | 1,00 | 23$^h$56$^m$4$^s$ | 29,8 |
| **Marte** | 1,524 | 0,107 | 3 397 | 3,9 | 1,88 | 24$^h$37$^m$22$^s$ | 24,1 |
| **Jupiter** | 5,203 | 318 | 71 400 | 1,3 | 11,86 | 9$^h$50$^m$ | 13,1 |
| **Saturn** | 9,539 | 95,2 | 60 400 | 0,7 | 29,46 | 10$^h$14$^m$ | 9,6 |
| **Uranus** | 19,182 | 14,6 | 25 400 | 1,4 | 84,02 | 10$^h$49$^m$ | 6,8 |
| **Neptun** | 30,07 | 17,2 | 24 500 | 1,6 | 164,78 | 15$^h$48$^m$ | 5,4 |

*Tabelul 2*

**Planetele pitice ale Sistemului Solar (date generale)**

| Planeta | Distanţa medie până la Soare, UA | Masa (în mase terestre) | Raza medie, km | Densitatea medie, kg/m$^3$, 10$^3$ | Perioada siderală, ani | Perioada de rotaţie axială | Viteza orbitală medie, km/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ceres** | 2,766 | 0,00016 | 975x909 | 2,08 | 4,6 | 9$^h$ | 17,88 |
| **Pluto** | 39,4 | 0,0022 | 2306±20 | 2,0 | 248 | 6,387$^d$ | 4,666 |
| **Haumea** | 43 | 0,0007 | 1960x1518x996 | 3,5 | 285 | 3,9$^h$ | |
| **Makemake** | 45 | 0,0005 | 1500x1420 | ~2 | 309,9 | | 4,419 |
| **Eris** | 67,67 | 0,0028 | 2400±300 | 2,5 | 557 | >8$^h$ | 3,437 |

Capitolul 9

# TABLOUL ȘTIINȚIFIC AL LUMII

## 9.1. ETAPELE DE DEZVOLTARE A TABLOULUI FIZIC AL LUMII

Ajunşi la finele cursului liceal de fizică şi astronomie, să analizăm evoluarea acestui domeniu de la începuturi până în prezent şi să urmărim formarea conceptelor despre lume în perioadele respective.

Se consideră că primele cunoştinţe în domeniul fizicii au fost obţinute încă în Antichitate. Tales din Milet (sec. VI î.Hr.) ştia că chihlimbarul frecat cu ţesătură de lână atrage corpuri uşoare, iar magnetita atrage obiectele din fier. În secolele V–IV î.Hr., Leucip şi Democrit au formulat ideea despre existenţa unei limite a divizibilităţii substanţei, a unor particule indivizibile – a atomilor. Aristotel (sec. IV. î.Hr.) a pus bazele mecanicii: a descris mişcarea mecanică, a evidenţiat mişcările rectilinii şi curbilinii, a formulat regula compunerii deplasărilor reciproc perpendiculare.

În secolul următor, Euclid a formulat legea propagării rectilinii a luminii, a stabilit legile reflexiei luminii, iar Arhimede a obţinut unele rezultate în domeniul mecanicii: a introdus noţiunile de centru de greutate şi de moment al forţei, a formulat legea pârghiei, a stabilit legea hidrostaticii (cunoscută în prezent ca legea lui Arhimede) şi condiţiile de plutire a corpurilor.

În era noastră, Heron din Alexandria (sec. I) a descris o serie de mecanisme simple: scripeţii, pana, şurubul, vârtejul, iar Ptolemeu (sec. II) a descris fenomenul refracţiei luminii, a elaborat forma definitivă a sistemului geocentric al lumii.

Această enumerare de descoperiri denotă că în Antichitate au apărut acei germeni care, dezvoltându-se, au devenit capitolele importante ale fizicii: mecanica, electrodinamica, fizica moleculară şi optica.

La mijlocul secolului al XVI-lea, Nicolaus Copernic a publicat lucrarea sa fundamentală *Despre mişcările de revoluţie ale corpurilor cereşti*, în care a fundamentat concepţia heliocentrică, potrivit căreia Pământul, împreună cu celelalte planete, se roteşte simultan în jurul Soarelui şi al propriilor axe. La începutul secolului următor, Johannes Kepler a descoperit legile mişcării planetelor în jurul Soarelui, argumentând sistemul heliocentric.

Secolul XVII s-a remarcat prin apariţia a două lucrări în care au fost puse bazele mecanicii. În 1632, Galileo Galilei a publicat *Dialogul despre două sisteme principale ale lumii*, în care a formulat două principii fundamentale ale mecanicii – principiul relativităţii şi cel al inerţiei. În anul 1687 a văzut lumina tiparului lucrarea lui Isaac Newton *Principiile matematice ale filosofiei naturale*, în care au fost expuse noţiunile fundamentale ale mecanicii, trei principii ale dinamicii şi legea atracţiei universale. În baza acestor principii, a fost elaborat **tabloul mecanic al lumii**, conform căruia toate fenomenele din natură se reduc doar la mişcări mecanice, adică la schimbarea poziţiilor corpurilor unele faţă de altele. Corpurile sunt caracterizate de masele şi dimensiunile lor spaţiale, mişcările lor fiind independente de structura internă.

În mecanica newtoniană spaţiul şi timpul sunt considerate absolute şi independente între ele. Proprietăţile spaţiului şi timpului nu sunt influenţate de corpuri şi de mişcările acestora. Se admite că spaţiul este omogen

și izotrop (proprietăţile lui sunt identice în toate regiunile spaţiului și în toate direcţiile), iar timpul omogen decurge uniform în tot spaţiul. Interacţiunea dintre corpuri se transmite momentan și este caracterizată de forţe, ale căror valori depind de parametrii corpurilor, de poziţiile lor reciproce (distanţa dintre ele), iar în cazul corpurilor aflate în contact – de vitezele lor relative. Cunoscând forţele ce acţionează asupra corpului, poziţiile și vitezele punctelor lui la un moment de timp considerat iniţial, în baza principiilor mecanicii, pot fi determinate poziţiile și vitezele lor la orice moment de timp ulterior. Au fost rezolvate, astfel, diferite probleme de mișcare a corpurilor, începând cu cele mai simple (alunecarea corpului pe planul înclinat sau mișcarea corpului aruncat sub un unghi faţă de orizontală), precum și probleme de mișcare a planetelor și a sateliţilor lor. Este bine cunoscută previziunea, în baza legităţilor mecanicii și a observaţiilor astronomice, făcută de Le Verrier privind existenţa unei planete, necunoscute la timpul respectiv și descoperită ulterior (a. 1846) de către Gallé – planeta Neptun.

Principiile mecanicii au fost aplicate cu succes și în alte ramuri ale fizicii. În teoria cinetico-moleculară a gazelor ideale – sisteme de molecule în mișcare haotică – a fost dedusă formula fundamentală a acestei teorii – relaţia dintre presiunea gazului, concentraţia moleculelor și energia cinetică medie a mișcării lor haotice de translaţie.

În optică, Newton afirma că lumina este un flux de corpusculi. Considerând elastice ciocnirile dintre corpusculi și oglindă, el a dedus legile reflexiei luminii. A dedus, de asemenea, legile refracţiei luminii, considerând că la trecerea din aer într-un mediu transparent acesta atrage corpusculii de lumină în interior, unde aceștia se deplasează cu viteze mai mari decât în aer (vid).

Succesul obţinut în explicarea unor fenomene ale naturii, în baza principiilor mecanicii, a creat iluzia că acestea sunt unicele principii fundamentale ale naturii.

În această ordine de idei, Einstein releva: „…impresiona faptul că metodele mecanice erau aplicate cu succes în domenii care nu aveau nimic cu mecanica: teoria mecanică a luminii…; teoria cinetică a gazelor...; teoria conducţiei căldurii…”.

În primele două decenii ale secolului XIX au fost efectuate cercetări vaste în domeniul opticii. Young, Fresnel, Fraunhofer, Malus și Brewster au realizat o serie de experimente și studii teoretice privind interferenţa, difracţia și polarizarea luminii. S-a confirmat teoria ondulatorie a luminii, propusă de către Huygens (a. 1678). S-a stabilit că undele de lumină sunt unde transversale. Către mijlocul secolului al XIX-lea, natura ondulatorie a luminii era considerată un fapt demonstrat.

Anul 1820 a fost unul de cotitură în fizica fenomenelor electrice și magnetice. Oersted a observat influenţa curentului electric asupra acului magnetic situat în vecinătatea conductorului parcurs de curent. În același an, Ampère a efectuat o serie de experimente în care a cercetat interacţiunea conductoarelor parcurse de curent electric și a stabilit expresia pentru forţa respectivă, cunoscută în prezent cu denumirea de *forţă electrodinamică* sau *forţa Ampère* (expresia forţei de interacţiune dintre sarcinile electrice punctiforme a fost stabilită în 1785 de către Coulomb). Descoperirea fenomenului inducţiei electromagnetice de către Faraday (a. 1831) și a autoinducţiei de către Henry (a. 1832) a determinat utilizarea vastă a curentului electric în industrie, astfel încât veacul XIX a intrat în istorie ca **secolul electricităţii**. Aceste descoperiri au demonstrat, de asemenea, existenţa unei interdependenţe indestructibile între fenomenele electrice și cele magnetice. Trebuie de menţionat, de asemenea, formularea de către Faraday a ideii despre câmp și introducerea noţiunii de „linii de forţă”, cunoscute în prezent ca linii de intensitate a câmpului electric, și de linii de inducţie magnetică.

Astfel, în prima jumătate a secolului al XIX-lea au fost descoperite o serie de fenomene importante din domeniul electromagnetismului, au fost introduse noţiuni fizice necesare descrierii lor și au fost stabilite legităţile experimentale respective.

Interpretarea teoretică și generalizarea rezultatelor din domeniul dat a fost efectuată de către Maxwell prin elaborarea **electrodinamicii** (1860–1865) – teoria câmpului electromagnetic. La baza acesteia se află un sistem de ecuaţii fundamentale, cunoscute sub numele de ecuaţiile lui Maxwell pentru câmpul electromagnetic. Fiind aplicate la sisteme fizice concrete, la ecuaţiile menţionate se adaugă ecuaţiile materiale ce exprimă anumite relaţii dintre parametrii sistemului considerat.

În cadrul teoriei sale, Maxwell nu numai că a reușit să explice faptele experimentale ce-i erau cunoscute, dar și să facă preziceri în domeniul fizicii, ceea ce este deosebit de important. Astfel, pe cale pur teoretică a prevăzut existenţa undelor electromagnetice

și a descris proprietăţile lor. A stabilit că undele de lumină și cele electromagnetice au proprietăţi identice, confirmându-se, pe această cale, natura electromagnetică a luminii.

Experimental, undele electromagnetice au fost descoperite de către Hertz (1888).

Către ultimul deceniu al secolului XIX s-a conturat **tabloul electromagnetic al lumii.**

Tentativele de a explica toate fenomenele naturii în limitele unui sau altui tablou fizic din cele menţionate nu s-au încununat de succes. S-a constatat că aceste tablouri se completează reciproc, dar împreună nu pot explica o parte din fenomene.

Spre finele secolului XIX au fost realizate trei descoperiri importante: razele Röntgen (a. 1895), radioactivitatea (a. 1896) și electronul (a. 1897). Rămâneau însă neexplicate legităţile experimentale ale radiaţiei termice, ale efectului fotoelectric și ale spectrelor atomilor.

Nesoluţionată era și problema eterului, a mediului ipotetic purtător al undelor de lumină. Au fost întreprinse încercări de a-l descoperi și a-i cerceta proprietăţile. Rezultatele însă erau contradictorii, „curenţii de eter" rămâneau nedescoperiţi. Au fost emise diferite ipoteze, în baza cărora s-au obţinut și rezultate corecte, dar acestea nu constituiau un sistem unic.

Teoria respectivă a fost elaborată de către Einstein (a. 1905) – **teoria relativităţii restrânse**. În cadrul acesteia însă eterul nu și-a găsit loc, fiind eliminat din fizică. De asemenea, spaţiul și timpul nu mai sunt considerate absolute și independente, ci relative și legate reciproc. S-a demonstrat că interacţiunea, în particular cea electromagnetică, nu se transmite momentan, viteza maximă de transmitere a ei fiind egală cu viteza luminii în vid, iar între masă și energie există o anumită relaţie. Teoria relativităţii restrânse indică limita de aplicabilitate a mecanicii newtoniene (viteze $v << c$).

Planck a explicat legităţile radiaţiei termice în baza ipotezei privind cuantele de energie. Ipoteza respectivă a fost dezvoltată și folosită la explicarea și altor fenomene. Către mijlocul anilor '20 ai secolului XX din ea s-a constituit **mecanica cuantică**, aplicată la descrierea proprietăţilor sistemelor microscopice – atomilor și moleculelor. S-a constatat că particulele de substanţă posedă proprietăţi ondulatorii, iar undele electromagnetice – proprietăţi corpusculare. Ca rezultat, noţiunea de traiectorie aplicată la microparticule își pierde sensul. Este imposibilă determinarea simultană a poziţiilor și impulsurilor acestora, necesare pentru a construi traiectoria particulei, și stabilirea poziţiei exacte a acesteia la orice moment de timp ulterior. În fizica cuantică poate fi calculată doar probabilitatea că microparticula se află la momentul dat într-o regiune sau alta a spaţiului. Energia și unele din caracteristicile microparticulei pot lua doar anumite valori, discrete, spre deosebire de fizica clasică, în care aceleași mărimi variază în mod continuu.

Pentru fizica secolului XX este caracteristică studierea mai profundă a structurii substanţei. Descoperirea electronului (a. 1897) a fost urmată de descoperirea nucleului (a. 1911) și de stabilirea modelului nuclear al atomului. În anul 1919 a fost descoperit protonul, iar în 1932 – neutronul, și tot în același an a fost adoptat modelul protono-neutronic al nucleului. De asemenea, în anul 1932 Anderson a descoperit pozitronul – prima antiparticulă, confirmând astfel ipoteza lui Dirac despre existenţa antiparticulelor. Fermi a elaborat (a. 1933) teoria dezintegrării β în care a fost dezvoltată ipoteza lui Pauli (a vedea *tema 7.3, a*). Astfel s-a constituit o ramură nouă a fizicii, cea a particulelor elementare.

Un succes al fizicii cuantice a fost aplicarea metodelor ei la descrierea proprietăţilor sistemelor formate dintr-un număr mare de microparticule. Au fost explicate proprietăţile metalelor, inclusiv starea lor de supraconductibilitate la temperaturi foarte joase.

În cadrul teoriei cuantice au fost descrise proprietăţile electrice și optice ale semiconductoarelor, influenţa câmpurilor electrice și magnetice asupra acestora. În urma cercetărilor au fost inventate dioda semiconductoare (joncţiunea *p–n*), apoi tranzistorul. În consecinţă, au fost miniaturizate mai multe dispozitive electronice. Un alt succes este realizarea telefoniei mobile. După cum se cunoaște, inventarea maserului și a laserului a fost posibilă numai în cadrul fizicii cuantice. Astfel,

> **fizica secolului XX s-a dezvoltat sub semnul teoriei relativităţii și a mecanicii cuantice**

și s-a remarcat prin aplicaţii de importanţă majoră.

Pentru perioada respectivă este caracteristică, de asemenea, interconexiunea fizicii cu alte ramuri ale științei. Ca rezultat, s-au dezvoltat: astrofizica, geofizica, biofizica, chimia cuantică etc.

Savanţii sunt convinși că secolul XXI va fi încununat de noi succese ale fizicii și aplicaţii, astăzi inimaginabile pentru noi.

## 9.2. ASTRONOMIA ȘI CONCEPȚIA ȘTIINȚIFICĂ DESPRE LUME

În istoria astronomiei, mai multe teorii și descoperiri fundamentale au revoluționat dezvoltarea științei și au contribuit la schimbarea concepției științifice despre lume.

Prima revoluție științifică a avut loc în secolele VI–IV î.Hr., în urma căreia a luat naștere știința astronomiei reflectată în lucrările lui Aristotel (384–322 î.Hr.), Aristarh din Samos (320–250 î.Hr.) și Hiparh (190–125 î.Hr.).

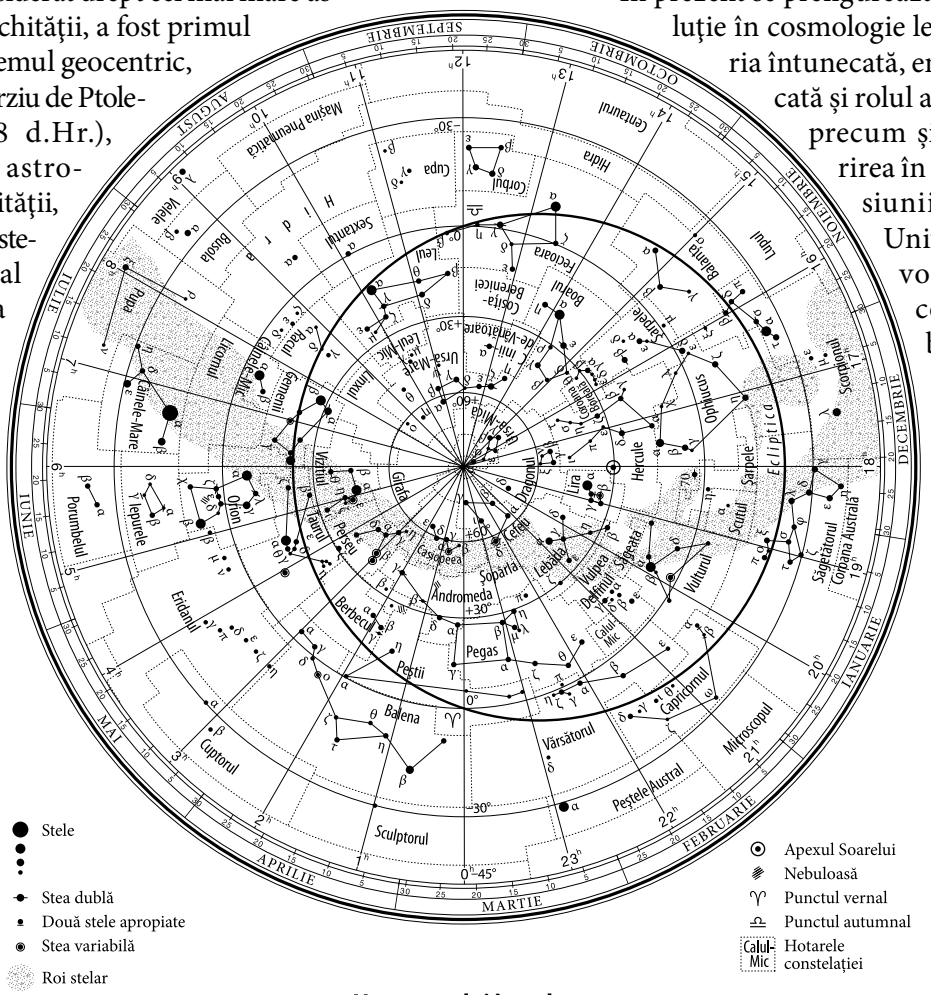
Aristotel a alcătuit prima schemă geocentrică a Universului, în centrul căreia a pus Pământul nemișcat sub formă de sferă. Aristarh din Samos, supranumit „Copernic al lumii antice", a propus primul sistem heliocentric cu Soarele în centrul lumii, sistem redescoperit peste optsprezece secole de către marele astronom polonez Nicolaus Copernic.

Hiparh, considerat drept cel mai mare astronom al Antichității, a fost primul care a creat sistemul geocentric, dezvoltat mai târziu de Ptolemeu (100–168 d.Hr.), ultimul mare astronom al Antichității, care a elaborat sistemul geocentric al lumii având la bază teoria geometrică a epiciclurilor ce s-a menținut în știință circa 1 500 de ani.

A doua revoluție științifică în astronomie s-a produs în secolele XVI–XVIII, când s-a făcut o serie de descoperiri fundamentale, legate de numele lui Nicolaus Copernic (sistemul heliocentric al lumii), Galileo Galilei (primele observații telescopice), Johannes Kepler (legile mișcării planetelor) și Isaac Newton (legea atracției universale).

Următoarea revoluție în astronomie este legată de marile descoperiri din secolele XIX–XX: analiza spectrală, fotografia, undele radio, razele Röntgen și gama, deplasarea spre roșu a liniilor spectrale ale galaxiilor îndepărtate, interpretată ca expansiunea Universului, descoperirea quasarilor, pulsarilor și a stelelor neutronice, a radiației radio cosmice de fond, care este un argument în favoarea teoriei Marii Explozii (Big Bang) ș.a. Tabloul științific al lumii s-a întemeiat pe noile teorii ale spațiului și timpului: teoria relativității restrânse și teoria relativității generalizate ale lui Einstein, care au produs o revoluție în cosmologie.

În prezent se prefigurează o nouă revoluție în cosmologie legată de materia întunecată, energia întunecată și rolul antigravitației, precum și de descoperirea în 1998 a expansiunii accelerate a Universului, care vor întregi în continuare tabloul științific al lumii.




**Harta cerului înstelat**

# PLANȘĂ COLOR

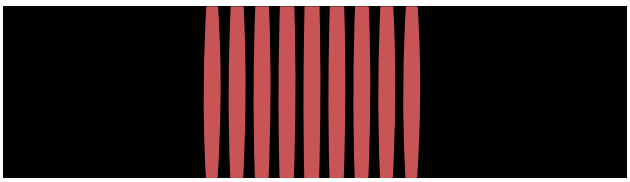


*Fig. I.* Interferența luminii
de la două surse coerente (dispozitivul lui Young)

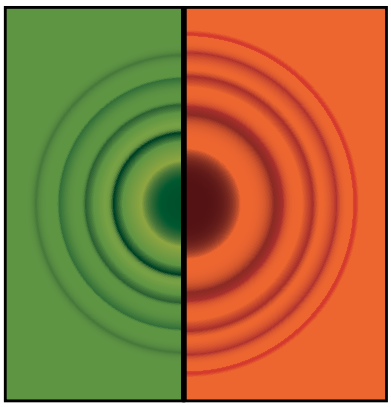



*Fig. II.* Inelele lui Newton
în lumină reflectată: a) verde; b) roșie

*Fig. III.* Difracția luminii de la o fantă îngustă.
Observați deosebirea tabloului de difracție de cel de interferență *(fig. I)*: la difracție lățimea franjelor și distanța dintre ele sunt variabile, iar la interferență ambele sunt constante.

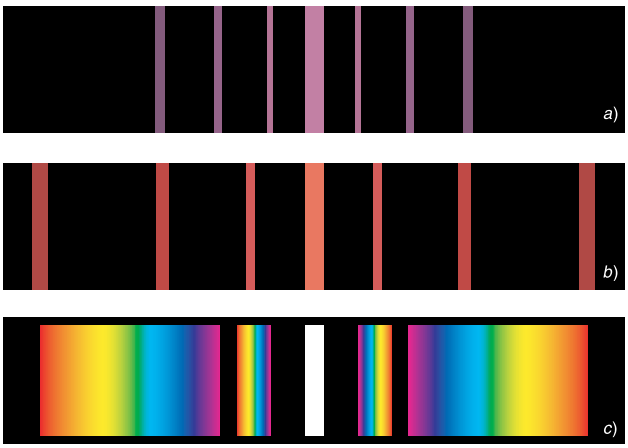



*Fig. IV.* Difracția luminii de la o rețea de difracție:
a) în lumină violetă; b) în lumină roșie; c) în lumină albă

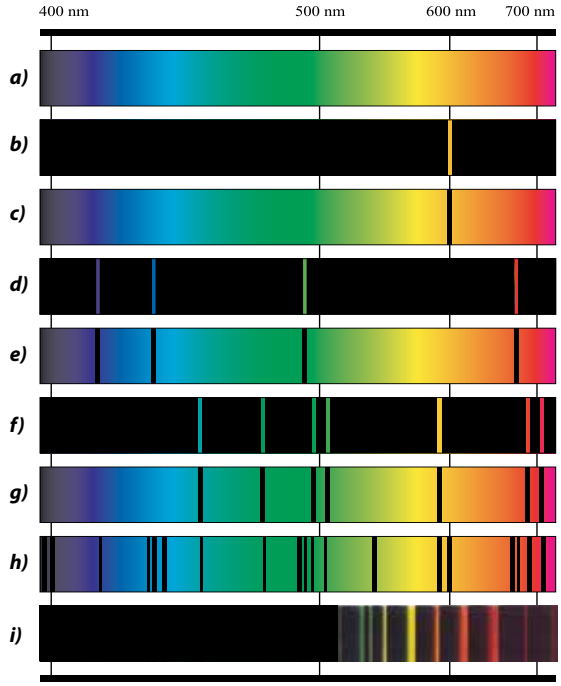



*Fig. V.* Spectrul de emisie continuu (a);
spectrul natriului: de emisie (b), de absorbție (c);
spectrul hidrogenului: de emisie (d), de absorbție (e);
spectrul heliului: de emisie (f), de absorbție (g);
spectrul Soarelui: de absorbție (h), de emisie (i)

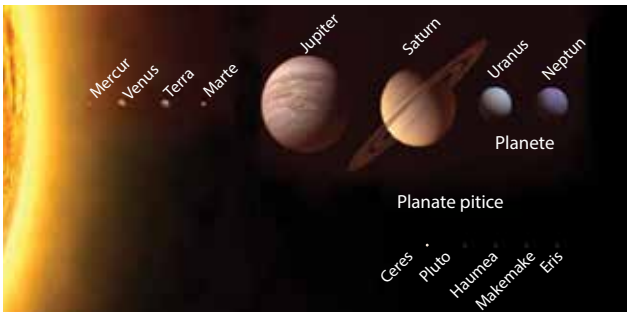



*Fig. VI.* Planetele Sistemului Solar

*Fig. VII.* Planeta Marte
(foto, telescopul Hubble)

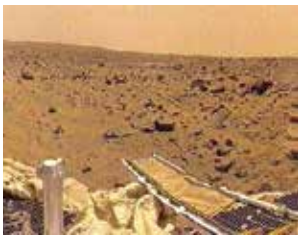


*Fig. VIII.* Suprafaţa planetei Marte

*Fig. IX.* Planeta Jupiter

*Fig. X.* Sateliţii galileeni ai planetei Jupiter

*Fig. XI.* Planeta Saturn

*Fig. XII.* Planeta Uranus

*Fig. XIII.* Planeta Neptun

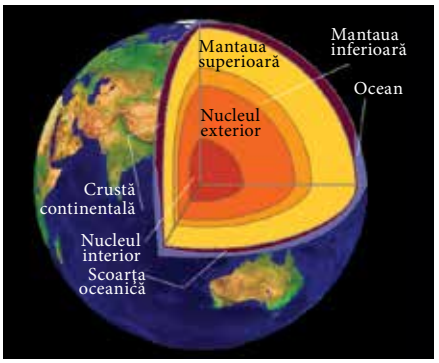



*Fig. XIV.* Structura Pamântului

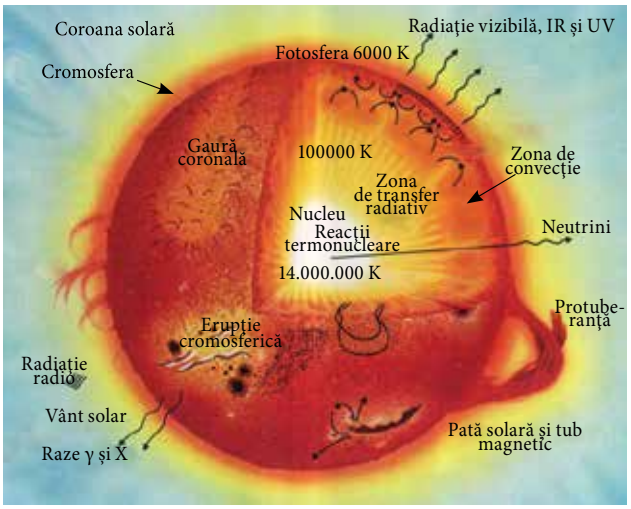



*Fig. XV.* Structura internă şi atmosfera Soarelui

*Fig. XVI.* Aurora polară

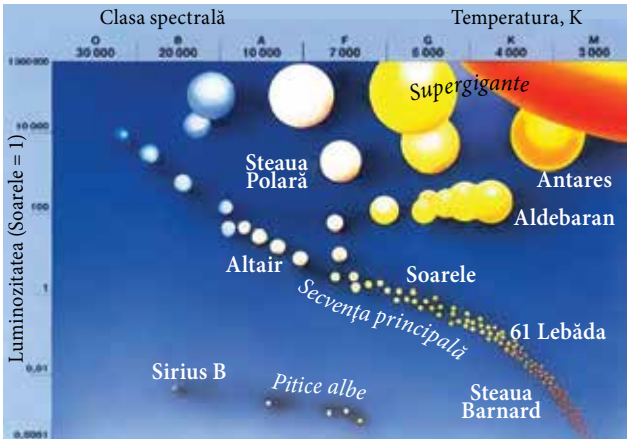



*Fig. XVII.* Diagrama „spectru–luminozitate” („Hertzsprung–Russell”)

# TESTE DE EVALUARE SUMATIVĂ

## ELECTROMAGNETISMUL

### PROFIL REAL

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | **a)** Forța electromagnetică este maximă în cazul în care conductorul rectiliniu parcurs de curent electric este orientat … liniile de inducție magnetică. | 1 p. |
| | **b)** Tensiunea electromotoare de autoinducție într-un circuit este … cu viteza de variație a intensității curentului din acest circuit. Coeficientul de proporționalitate este … circuitului. | 2 p. |
| **2** | **Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A" și cu „F" dacă ea este falsă:** | |
| | **a)** Sensul liniei magnetice într-un punct oarecare al câmpului este indicat de polul nord al acului magnetic ce se poate roti liber și care este plasat în locul respectiv al câmpului. ☐ | 1 p. |
| | **b)** Autoinducția este fenomenul de inducție electromagnetică într-un circuit parcurs de curent continuu. ☐ | 1 p. |
| **3** | **Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile ce le exprimă:** | |
| | Inducția magnetică • • N | 1 p. |
| | Fluxul magnetic • • $A \cdot m^2$ | 1 p. |
| | Inductanța • • T | 1 p. |
| | *T.e.m.* de inducție • • mWb | 1 p. |
| | Forța electromagnetică • • V | 1 p. |
| | • H | |
| | Itemul 4 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția ***deoarece***. Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) și dacă între ele există relația ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | |
| **4** | **Valoarea forței electromagnetice care acționează asupra unui conductor rectiliniu, parcurs de curent electric din partea câmpului magnetic omogen în care se află, este în funcție de unghiul dintre sensul curentului în conductor și cel al inducției magnetice, *deoarece* liniile de inducție magnetică sunt linii închise.** | |
| | **Răspuns:** afirmația 1 – ☐; afirmația 2 – ☐; relația ***cauză–efect*** – ☐. | 3 p. |
| **5** | **O porțiune cu lungimea de 0,8 m a unui conductor rectiliniu, parcurs de curent electric cu intensitatea de 2,5 A, se află într-un câmp magnetic omogen a cărui inducție este egală cu 0,6 T. Determinați:** | |
| | **a)** valoarea maximă a forței electromagnetice care acționează asupra conductorului; | 2 p. |
| | **b)** unghiul format între conductor și vectorul inducției magnetice la care forța electromagnetică capătă o valoare de două ori mai mică decât valoarea maximă a sa. | 2 p. |
| **6** | **Un proton ($m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C), accelerat la o diferență de potențial de 3,34 kV, pătrunde într-un câmp magnetic omogen cu inducția de 50 mT, perpendicular pe liniile de inducție ale acestuia. Determinați:** | |
| | **a)** forța ce acționează asupra protonului din partea câmpului magnetic; | 4 p. |
| | **b)** raza cercului descris de proton în câmpul magnetic; | 2 p. |
| | **c)** perioada de rotație a protonului pe cercul descris. | 2 p. |
| **7** | **La modificarea fluxului magnetic care străbate conturul unui conductor de rezistență R = 1 Ω de la 0,5 mWb până la 5 mWb, *t.e.m.* de inducție a devenit egală cu 5 V. Determinați:** | |
| | **a)** timpul $\Delta t$ în care se produce modificarea fluxului magnetic; | 2 p. |
| | **b)** intensitatea curentului de inducție. | 2 p. |
| **8** | **O bobină cu inductanța de 100 mH este străbătută de un flux magnetic egal cu 40 mWb. Determinați:** | |
| | **a)** energia câmpului magnetic al bobinei; | 2 p. |
| | **b)** intensitatea curentului continuu prin bobină. | 2 p. |

### PROFIL UMANIST

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | **a)** Forța electromagnetică este forța care acționează asupra … din partea …. | 1 p. |
| | **b)** Asupra particulei încărcate ce se mișcă într-un câmp magnetic acționează … , care întotdeauna este orientată … viteza particulei. | 1 p. |
| **2** | **Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile ce le exprimă:** | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Inducția magnetică | • | • $A \cdot m^2$ | 1 p. |
| | Fluxul magnetic | • | • T | 1 p. |
| | Inductanța | • | • mWb | 1 p. |
| | *T.e.m.* de inducție | • | • V | 1 p. |
| | | | • H | |
| | Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția ***deoarece***. Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) și dacă între ele există relația ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | | | |
| **3** | **Un electron care pătrunde într-un câmp magnetic va avea energie cinetică constantă, *deoarece* forța Lorentz nu efectuează lucru mecanic.** | | | |
| | **Răspuns:** afirmația 1 – ☐; afirmația 2 – ☐; relația ***cauză–efect*** – ☐. | | | 3 p. |
| **4** | **Cu ce forță acționează un câmp magnetic de inducție $B = 0{,}2$ T asupra unui conductor rectiliniu de lungime $l = 50$ cm, parcurs de un curent cu intensitatea de 4 A, dacă el este perpendicular pe liniile de câmp?** | | | 2 p. |
| **5** | **O spiră din sârmă cu rezistența de 0,01 Ω, de forma unui pătrat cu latura de 10 cm, se află într-un câmp magnetic omogen de inducție $B = 10$ mT. Planul spirei formează un unghi de 30° cu liniile de inducție ale câmpului. Calculați:** | | | |
| | **a)** fluxul magnetic prin această spiră; | | | 3 p. |
| | **b)** sarcina totală care trece prin spiră la dispariția câmpului magnetic. | | | 3 p. |
| **6** | **Un electron cu sarcina $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C și masa $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg pătrunde într-un câmp magnetic omogen cu inducția $B = 50$ mT, având viteza $v = 5 \cdot 10^7$ m/s perpendiculară pe liniile de câmp. Determinați:** | | | |
| | **a)** valoarea forței care acționează asupra electronului; | | | 2 p. |
| | **b)** raza traiectoriei descrise de electron; | | | 3 p. |
| | **c)** perioada și frecvența de rotație a electronului în câmpul magnetic. | | | 3 p. |

# CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV. OSCILAȚII ȘI UNDE ELECTROMAGNETICE

## PROFIL REAL

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Continuați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | a) Intensitatea curentului și t.e.m., induse într-un cadru metalic rotitor, devin maxime când fluxul magnetic prin acesta este … . | 1 p. |
| | **b)** Un circuit RLC serie în curent alternativ se află în rezonanță atunci când impedanța sa este … . | 1 p. |
| **2** | **Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A" și cu „F" dacă ea este falsă:** | |
| | **a)** Mărimea inversă capacității în cazul oscilațiilor electrice corespunde constantei de elasticitate în cazul celor mecanice. ☐ | 1 p. |
| | **b)** Undele electromagnetice sunt unde longitudinale. ☐ | 1 p. |
| | Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția ***deoarece***. Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) și dacă între ele există relația ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | |
| **3** | **Defazajul dintre intensitatea curentului și tensiunea de alimentare a unui circuit de curent alternativ ce conține doar rezistență activă este $\pi/2$, *deoarece* energia consumată de rezistor se transformă în energie termică.** | |
| | **Răspuns:** afirmația 1 – ☐; afirmația 2 – ☐; relația ***cauză–efect*** – ☐. | 3 p. |
| **4** | **Un condensator este conectat în serie cu o bobină de inductanță $L = \frac{1}{\pi}$ mH. Pentru ce valoare a capacității condensatorului curentul cu frecvența de $1$ kHz va fi maxim?** | 2 p. |
| **5** | **Un fascicul paralel de lumină monocromatică este incident normal pe o rețea de difracție cu perioada de 4 μm. Determinați lungimea de undă a luminii folosite dacă unghiul dintre direcțiile spre cele două maxime principale de ordinul 3 din tabloul de difracție este de 60°.** | |
| **6** | **Un circuit RLC serie de curent alternativ este parcurs de un curent de intensitate $i(t) = 10\sqrt{2}\sin(200\pi t - \varphi)(A)$. Elementele reale ale circuitului au următorii parametri: condensatorul – capacitatea $C = \frac{500}{\pi}$ μF și rezistența $R_1 = 0{,}1$ Ω; bobina – inductanța $L = \frac{5}{\pi}$ mH și rezistența $R_2 = 3{,}9$ Ω; rezistorul – rezistența $R_3 = 8$ Ω. Determinați:** | |
| | **a)** frecvența tensiunii instantanee de la bornele circuitului; | 1 p. |
| | **b)** reactanțele inductivă și capacitativă, precum și impedanța circuitului; | 3 p. |
| | **c)** factorul de putere și defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului. | 2 p. |

## PROFIL UMANIST

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | **a)** Valorile maxime ale tensiunii și intensității curentului alternativ sunt de … ori mai … decât cele efective. | 1 p. |
| | **b)** Constanta rețelei de difracție reprezintă … . | 1 p. |
| **2** | **Determinați dacă afirmația este adevărată, marcând cu „A" și cu „F" dacă ea este falsă:** | |
| | **a)** Un curent cu frecvența de $60\ \text{Hz}$ își schimbă sensul de 100 de ori în fiecare secundă. ☐ | 1 p. |
| | **b)** Distanța la care se propagă unda electromagnetică în timp de o perioadă este numită lungime de undă. ☐ | 1 p. |
| | Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția ***deoarece***. Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) și dacă între ele există relația ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | |
| **3** | **Transportul energiei electrice la distanțe mari se realizează la tensiuni înalte, *deoarece* pierderile de energie în linia de transport scad odată cu creșterea tensiunii.** | |
| | **Răspuns:** afirmația 1 – ☐; afirmația 2 – ☐; relația ***cauză–efect*** – ☐. | 3 p. |
| **4** | **Mihai ascultă muzică la un post de radio recepționat la frecvența de 71,57 MHz. Care este lungimea de undă a undelor emise de acest post?** | |
| **5** | **Pe o rețea de difracție cu lungimea de 1,5 cm și 3 000 de zgârieturi lumina monocromatică cu lungimea de undă de 550 nm este incidentă normal. Determinați:** | |
| | **a)** constanta rețelei de difracție; | 2 p. |
| | **b)** numărul total de maxime obținute cu această rețea. | 2 p. |
| **6** | **Valoarea instantanee a intensității curentului alternativ este dată de ecuația $i(t) = 4{,}2 \sin(100\pi t + \pi/6)$ (A). Determinați:** | |
| | **a)** valoarea efectivă a intensității curentului; | 2 p. |
| | **b)** faza inițială și frecvența acestui curent; | 2 p. |
| | **c)** valoarea intensității curentului la momentul de timp $t_1 = 0{,}02$ s. | 3 p. |

# ELEMENTE DE TEORIE A RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE ȘI DE FIZICĂ CUANTICĂ

## PROFIL REAL

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Continuați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | **a)** În conformitate cu primul postulat al teoriei relativității restrânse (al lui Einstein), legile fizicii … . | 1 p. |
| | **b)** Variația masei corpului și variația energiei lui … . | 1 p. |
| | **c)** Efectul fotoelectric extern se produce numai dacă energia fotonilor incidenți … . | 1 p. |
| **2** | **Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A" și cu „F" dacă ea este falsă:** | |
| | **a)** Viteza luminii în vid nu depinde de viteza sursei care o emite. ☐ | 1 p. |
| | **b)** Energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din metal de radiația incidentă pe el este proporțională cu fluxul de energie al acesteia. ☐ | 1 p. |
| | Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția ***deoarece***. Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) și dacă între ele există relația ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | |
| **3** | **Valoarea curentului fotoelectric de saturație nu depinde de fluxul de energie al radiației incidente pe catod, deoarece efectul fotoelectric se produce numai dacă frecvența radiației depășește frecvența de prag.** | |
| | **Răspuns:** afirmația 1 – ☐; afirmația 2 – ☐; relația ***cauză–efect*** – ☐. | 3 p. |
| **4** | **Determinați energia fotonului al cărui impuls este egal cu $1{,}2 \cdot 10^{-27}$ kg · m/s.** | 2 p. |
| **5** | **Energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din metal este egală cu $2{,}875 \cdot 10^{-19}$ J, dacă frecvența radiației electromagnetice incidente pe metal este egală cu $1{,}4 \cdot 10^{15}$ Hz. Să se determine:** | |
| | **a)** lucrul de extracție pentru acest metal; | 3 p. |
| | **b)** energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din acest metal de radiația electromagnetică a cărei frecvență este egală cu $1{,}8 \cdot 10^{15}$ Hz. | 3p. |

# ELEMENTE DE FIZICĂ A ATOMULUI ȘI A NUCLEULUI

## PROFIL REAL

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Continuaţi următoarele afirmaţii astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | **a)** Energia de legătură pe un nucleon este egală cu … . | 1 p. |
| | **b)** Prin dezintegrare $\alpha$ elementul radioactiv se transformă într-un element situat în tabelul periodic al elementelor … . | 1 p. |
| **2** | **Determinaţi dacă afirmaţia este adevărată marcând cu „A” şi cu „F” dacă ea este falsă:** | |
| | **a)** La suprapunerea spectrului de emisie pe cel de absorbţie al aceluiaşi gaz se obţine un spectru continuu. ☐ | 1 p. |
| | **b)** Numărul de electroni din atomul ionizat este egal cu numărul de sarcini pozitive ale nucleului. ☐ | 1 p. |
| | **c)** Nucleul izotopului rubidiului $^{90}_{37}\mathrm{Rb}$ conţine cu 17 protoni mai mulţi decât neutroni. ☐ | 1 p. |
| | Itemul 3 este alcătuit din două afirmaţii legate între ele prin conjuncţia ***deoarece***. Stabiliţi dacă afirmaţiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) şi dacă între ele există relaţia ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | |
| **3** | **Între protonii din componenţa nucleului acţionează forţe de respingere electrică, însă ei cu neutronii nu se împrăştie, ci se menţin împreună, *deoarece* în jurul nucleului se mişcă electroni purtători de sarcină electrică negativă.** | |
| | **Răspuns:** afirmaţia 1 – ☐; afirmaţia 2 – ☐; relaţia ***cauză–efect*** – ☐. | 3 p. |
| **4** | **Să se determine frecvenţa fotonului emis de atomul de hidrogen la tranziţia electronului din starea cu energia de (–1,51) eV în cea cu energia egală cu (–3,39) eV.** | 3 p. |
| **5** | **În urma unui lanţ de transformări radioactive izotopul de toriu $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ se transformă în izotopul de plumb $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$. Determinaţi:** | |
| | **a)** numărul de dezintegrări α din acest lanţ …; | 2 p. |
| | **b)** numărul de dezintegrări β … . | 3 p. |
| **6** | **Izotopul de uraniu $^{235}_{92}\mathrm{U}$ absorbind un neutron lent fisionează în două fragmente şi doi neutroni.** | |
| | **a)** Știind că un fragment este izotopul $^{95}_{38}\mathrm{Sr}$, determinaţi numărul de ordine și numărul de masă al fragmentului al doilea. | 3 p. |
| | **b)** Calculaţi defectul de masă (în u) pentru izotopul de uraniu $^{235}_{92}\mathrm{U}$, știind că masa atomului de acest izotop este egală cu 235,04393 u, masa atomului de hidrogen $^{1}_{1}\mathrm{H}$ este egală cu 1,00782 u și a neutronului – cu 1,00866 u. | 3 p. |

# ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ, DE FIZICĂ A ATOMULUI ȘI A NUCLEULUI

## PROFIL UMANIST

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Completaţi următoarele afirmaţii astfel ca ele să fie adevărate:** | |
| | **a)** Electronii sunt extraşi din metal numai dacă frecvenţa luminii incidente nu este mai … decât cea de prag. | 1 p. |
| | **b)** În centrul atomului se află … în care este concentrată practic toată masa atomului și care este încărcat cu sarcină electrică … . | 1 p. |
| | **c)** La emisia particulelor β elementul radioactiv se transformă într-un element situat în tabelul periodic al elementelor în căsuţa … . | 1 p. |
| **2** | **Determinaţi dacă afirmaţia este adevărată marcând cu „A” şi cu „F” dacă ea este falsă:** | |
| | **a)** Lucrul de extracţie a electronului din metal depinde de natura metalului și nu depinde de lungimea de undă a luminii incidente. ☐ | 1 p. |
| | **b)** Izotopii sunt atomii aceluiași element chimic, dar nucleele lor conţin aceleași numere de neutroni la numere diferite de protoni. ☐ | 1 p. |
| | **c)** La dezintegrarea α numărul de masă A se micșorează cu 2, iar Z se micșorează cu 4. ☐ | 1 p. |
| | Itemul 3 este alcătuit din două afirmaţii legate între ele prin conjuncţia ***deoarece***. Stabiliţi dacă afirmaţiile sunt adevărate (scriind **A**) sau false (scriind **F**) şi dacă între ele există relaţia ***cauză–efect*** (scriind **da** sau **nu**). | |

| | | |
|---|---|---|
| **3** | **Energia cinetică a fotoelectronilor nu depinde de lungimea de undă a luminii incidente, *deoarece* lucrul de extracţie a fotoelectronilor depinde de natura substanţei fotocatodului.** | |
| | **Răspuns:** afirmaţia 1 – ☐; afirmaţia 2 – ☐; relaţia ***cauză–efect*** – ☐. | 3 p. |
| **4** | **Să se determine energia fotonului ce corespunde luminii galbene cu lungimea de undă de 560 nm.** | 2 p. |
| **5** | **Un atom a trecut dintr-o stare cu energia de $-5{,}42 \cdot 10^{-19}$ J în alta cu energia de $-0{,}87 \cdot 10^{-19}$ J. Determinaţi:** | |
| | **a)** a fost emis sau absorbit fotonul respectiv; | 3 p. |
| | **b)** energia acestui foton. | 3 p. |
| **6** | **Determinaţi numărul atomic Z şi cel de masă A pentru:** | |
| | **a)** nucleul-ţintă X din reacţia nucleară $X + {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{22}_{11}\mathrm{Na} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$; | 2 p. |
| | **b)** nucleul Y ce rezultă din reacţia nucleară ${}^{55}_{25}\mathrm{Mn} + {}^{1}_{1}p \rightarrow \mathrm{Y} + {}^{1}_{0}n$. | 2 p. |

# RĂSPUNSURI LA PROBLEME

**Capitolul 1. Electromagnetismul**

pag. 9 **4.** 0,1 T; **5.** 0,72 N; **6.** 0,36 N; **7.** În funcţie de sensul curentului prin conductor forţa electromagnetică se adună la cea de greutate sau se scade din ea; respectiv, tensiunea fiecărui fir este egală cu 0,055 N şi cu 0,025 N.

pag. 11 **4.** $3{,}2 \cdot 10^{-14}$ N; $2{,}77 \cdot 10^{-14}$ N; **5.** $5{,}3 \cdot 10^{16}$ m/s$^2$.

pag. 13 **4.** 2,5 mT; **5.** 1,25 m.

pag. 20 **7.** 3 mWb; **8.** 1 mC; **9.** 45,4 μC.

pag. 22 **5.** 100 V.

pag. 23 **3.** 10 mJ; **4.** a) 0,5 A; b) 4 mWb.

**Capitolul 2. Curentul electric alternativ**

pag. 26 **6.** 100 de ori.

pag. 27 **3.** ≈ 311 V; **4.** 2 A; 1,41 A.

pag. 35 **15.** 20 mA; 28,3 mA; **16.** 6,28 Ω; **17.** 16 Hz; **18.** 18 Ω; 47,6 mH; 0,97 rad; **19.** 13,3 μF; –0,93 rad; 150 V; **20.** 1,92 A.

pag. 38 **8.** a) 20 Ω; b) 6 A; c) 0,8; d) 576 W; 432 VAR; 720 VA; **9.** a) 12 Ω; b) $12\sqrt{3}$ Ω; c) 3,6 kW; 2,08 kVAR; 4,16 kVA.

pag. 41 **9.** 0,2; 5 000; **10.** 3,6 A; **11.** 4,75 A.

**Capitolul 3. Oscilaţii şi unde electromagnetice**

pag. 45 **8.** 40 μF; **9.** Se micşorează de 4 ori; **10.** 1,97 mm.

pag. 48 **6.** 1 884 m.

pag. 59 **12.** 0,6 μm; **13.** 1,2 μm.

pag. 63 **9.** 4,8 μm, 61°; **10.** 100 fante/mm.

pag. 68 **8.** 48,7°.

**Capitolul 4. Elemente de teorie a relativităţii restrânse**

pag. 75 **5.** 20 cm; **6.** În direcţia diagonalei mai lungi cu viteza u = 0,8 *c*.

pag. 76 **1.** $x = 7{,}8 \cdot 10^4$ m; $y = 2 \cdot 10^4$ m; $z = 0$; $t = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ s; **2.** a) 0,97 *c*; b) 1,5 *c*.

pag. 78 **6.** $4{,}5 \cdot 10^6$ kg = 4 500 tone; **7.** $2{,}68 \cdot 10^5$ kg = = 268 tone; **8.** $2\sqrt{2}\,c/3$.

**Capitolul 5. Elemente de fizică cuantică**

pag. 81 **4.** Corpul negru; **5.** Trandafir vizibil pe cană neagră; **7.** $2{,}87 \cdot 10^{-19}$ J; **8.** $2{,}5 \cdot 10^{13}$ Hz.

pag. 86 **5.** $3{,}61 \cdot 10^{-19}$ J = 2,26 eV; **6.** $9{,}5 \cdot 10^{-28}$ kg · m/s; roşie; **7.** 289 nm; **8.** $6{,}6 \cdot 10^{-20}$ J = 0,41 eV; **9.** $3{,}85 \cdot 10^5$ m/s.

pag. 90 **5.** ≈ $7{,}3 \cdot 10^{-11}$ m; **6.** Se micşorează de 2 ori.

**Capitolul 6. Elemente de fizică a atomului**

pag. 99 **10.** $4{,}56 \cdot 10^{14}$ Hz; $0{,}658 \cdot 10^{-6}$ m; **11.** $6{,}17 \cdot 10^{14}$ Hz; $0{,}486 \cdot 10^{-6}$ m.

**Capitolul 7. Elemente de fizică a nucleului atomic. Particule elementare**

pag. 104 **5.** $6{,}5 \cdot 10^{-15}$ m; **6.** 90 de protoni, 142 de neutroni.

pag. 106 **7.** 0,11236 u; **8.** 37,60 MeV; **9.** 0,58539 u; **10.** a) ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$; b) 980 MeV; c) 1,9 u; d) 196 u.

pag. 110 **5.** 84; 218; **12.** 8 zile; **13.** 87,5%; **14.** A 8-a parte.

pag. 114 **1.** Particula α; **2.** Izotopul mercurului ${}^{198}_{80}\mathrm{Hg}$; **3.** Izotopul carbonului ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$; **4.** Protonul; **6.** 2,785 MeV.

**Capitolul 8. Elemente de astronomie**

pag. 130 **1.** 42°55′; 66°21′; 19°29′; **2.** $1^h54^m37^s$; **3.** 42°55′; **4.** 66°57′; **5.** S-W; **6.** La poli; **8.** Echinocţiu; **9.** $8^h34^m19^s$; **10.** Racul, 5 august.

pag. 133 **1.** Da/nu; nu/da; **2.** 389,2; **3.** Distanţele Pământ–Lună, Pământ–Soare; **4.** Luna la apogeu; **5.** De la W spre E, N-E, S-E; **6.** Egală cu durata eclipsei de Lună pe Pământ; **8.** $\phi = 0{,}2–0{,}5$; **9.** Pământul în faza plină $\phi = 1$; **10.** Oricare, cu excepţia Pă-mântului.

pag. 135 **1.** $\varphi = 43°08'$; $\lambda = 1^h06^m$; **2.** 16 februarie 2011; **3.** La 4 august, ora $10^h32^m$ (ora Europei Centrale); **4.** Nu; da.

pag. 139 **1.** Seara la Vest, iar dimineaţa – la Est; **2.** Mercur: $t \leq 1^h$ la $h \leq 15°$ de la orizont; Venus: $t \leq 3^h$ la $h \leq 40°$ de la orizont; **3.** Venus – planetă interioară; **4.** t° ~ 500 °C; **7.** Axa înclinată cu 98°; **8.** Calculul perturbaţiilor planetei Uranus.

pag. 141 **1.** Nu; **2.** Asteroizii se deplasează faţă de stele; **3.** Catalogaţi 18 000, ~ $4 \cdot 10^{21}$ kg.

pag. 145 **1.** Principiul dinamului în rotaţia axială a Pământului; **2.** Ionizarea atmosferei. Intensitatea erupţiilor solare; **3.** Nu vor exista; **4.** Perioada de rotaţie a Lunii în jurul axei sale este egală cu perioada ei de revoluţie în jurul Pământului; **5.** Lumina solară reflectată de Pământ, iluminând suprafaţa Lunii, este percepută ca o lumină cenuşie pe Lună; **6.** Lipsa atmosferei pe Lună.

pag. 147 **1.** Superioară; **2.** Nu; **3.** Balanţa; **4.** Da.

pag. 149 **1.** 224, 7 zile; **2.** 2,36.

pag. 152 **1.** Da, din cauza difuziei luminii în atmosfera terestră; **2.** 13,4.